



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СЕРГЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Выпуск 23

Фундаментальные
и прикладные вопросы
современного грунтоведения

Материалы годичной сессии
Научного совета РАН по проблемам геоэкологии,
инженерной геологии и гидрогеологии
(31 марта - 1 апреля 2022 г.)

Москва
Издательство «Геоинфо»
2022

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной
геологии и гидрогеологии

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН
ОХОТИНСКОЕ ОБЩЕСТВО ГРУНТОВЕДОВ

СЕРГЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ

***Фундаментальные и прикладные вопросы
современного грунтоведения***

Выпуск 23

**Материалы годичной сессии
Научного совета РАН по проблемам геоэкологии,
инженерной геологии и гидрогеологии
(31 марта – 1 апреля 2022 г.)**



Москва
Издательство «Геоинфо»
2022

ББК 26.3
С 32
УДК 624.131.: 551.3.

Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. Выпуск 23. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (31 марта – 1 апреля 2022 г.). Москва: изд-во «ГеоИнфо», 2022. – 466 стр. ил.

ISBN 978-5-9908493-7-2

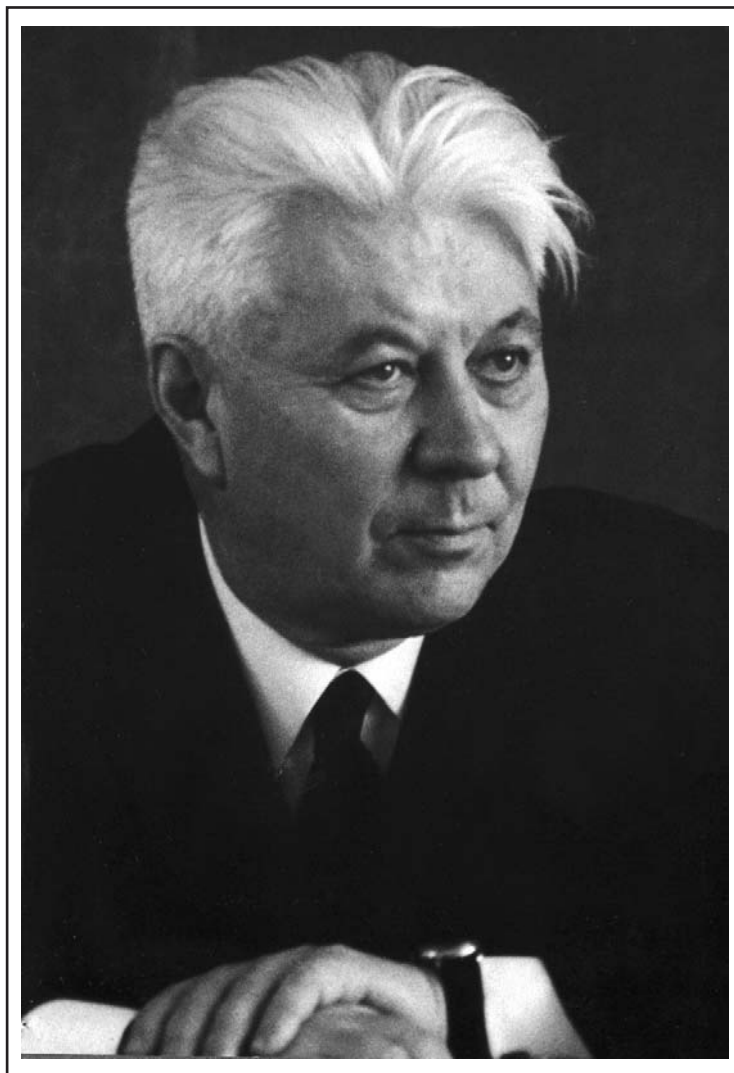
В сборнике опубликованы доклады, представленные на двадцать третью ежегодную конференцию «Сергеевские чтения» памяти академика Е.М. Сергеева – выездную сессию Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, организованную в г. Санкт-Петербурге при участии Охотинского общества грунтоведов 31 марта – 1 апреля 2022 г. Чтения были посвящены обсуждению фундаментальных и прикладных вопросов современного грунтоведения. В соответствии с обсуждавшимися на конференции темами, сборник состоит из следующих разделов: Развитие теории грунтоведения; Изучение состава и свойств грунтов в практике инженерно-геологических изысканий; Изучение массивов грунтов в целях прогнозирования и оценки опасных природных процессов; Методические вопросы изучения грунтов и моделирование; Геоэкологические аспекты изучения массивов природных и техногенных грунтов. Для специалистов, студентов и аспирантов в области инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии.

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я :

В.И. Осипов (главный редактор), Е.А. Вознесенский (зам. главного редактора),
Е.В. Булдакова, О.Н. Еремина (отв.секретарь), Ф.С. Карпенко, А.И. Казеев, И.В. Козлякова,
Н.Г. Мавлянова, П.С. Микляев.

© Научный совет РАН по проблемам
геоэкологии, инженерной геологии
и гидрогеологии, 2022

© Изд-во «ГеоИнфо», 2022



Академик РАН
Евгений Михайлович СЕРГЕЕВ
(1914 – 1997)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Двадцать третья научная конференция «Сергеевские чтения» в 2022 г. посвящена фундаментальным и прикладным вопросам современного грунтоведения. Эти вопросы в той или иной мере поднимаются исследователями на любых инженерно-геологических, геотехнических или изыскательских конференциях, так как грунтоведение – одно из трех основных научных направлений инженерной геологии, и его теоретические положения составляют ядро методического подхода при изучении грунтов и их массивов в связи с решением любых инженерных задач. Однако с момента проведения почти 20 лет назад Геологическим факультетом МГУ конференции «Многообразие грунтов: морфология, причины, следствия» (май 2003 г.) не было такого специализированного научного мероприятия по грунтоведению, как и не было ранее целиком «грунтоведческой» программы «Сергеевских чтений», хотя значительная часть научного наследия академика Е.М. Сергеева посвящена именно вопросам грунтоведения.

С другой стороны, за прошедшее 20-летие появились не только новые исследования и приборы в области изучения грунтов, но и возникли новые методические и практические задачи. Эти задачи вызваны вполне определенными тенденциями в современной строительной деятельности человечества. Если оставить в стороне неумеренно возросшие потребности общества и его технические возможности, то можно выделить следующие существенные особенности современной строительной теории и практики.

1. Появление технической возможности возведения сооружений в любом месте и на любых грунтах – будь то суша или акватория. Для современных технологий не существует понятия «невозможно построить» – это лишь вопрос стоимости строительства в заданном месте.

2. Широкое распространение строительства высотных зданий и быстрое освоение подземного пространства в крупных городах из-за концентрации в них населения с вытекающими из этого транспортными проблемами, что является одной из основных системных ошибок ныне существующей цивилизации.

3. Проектирование всех ответственных сооружений осуществляется численными методами в рамках различных пакетов программ, где расчет оснований производится по какой-либо из довольно многочисленных моделей поведения грунтов, базирующихся на их уравнениях состояния современной механики грунтов. Для этих расчетов требуется экспериментальное определение целого ряда характеристик грунтов, неизвестных в классической механике грунтов, что привело к развитию новых методов их полевых и лабораторных испытаний. К примеру, при проведении лабораторных испытаний грунтов привычное допущение о несжимаемости воды в порах грунта иногда становится методически некорректным и влечет ошибки в расчетах необходимых параметров, размывается граница между «недренированным» и «дренированным» испытанием, а необходимый диапазон измеряемых деформаций понижается до 10^{-7} - 10^{-6} .

Все это, безусловно, стимулирует научный поиск в области грунтоведения и приводит к новым интересным результатам. Организаторы Сергеевских чтений надеются, что встреча специалистов в этой области на нашей научной площадке приведет к формированию полезных контактов и вызовет плодотворные дискуссии.

В предлагаемый вашему вниманию сборник включено 78 докладов, представленных авторами из 22 субъектов РФ и 6 стран СНГ. Эти доклады редакционной коллегией сгруппированы в следующие основные секции:

1. Развитие теории грунтоведения (6 докладов)
2. Практика изучения состава и свойств грунтов при инженерно-геологических изысканиях (16 докладов)
3. Изучение массивов грунтов в целях прогнозирования и оценки опасных природных процессов (17 докладов)
4. Методические вопросы изучения грунтов и моделирование (16 докладов)
5. Геоэкологические аспекты изучения массивов природных и техногенных грунтов (23 доклада)

Значительное количество поступивших на конференцию докладов с весьма специализированной тематикой свидетельствуют об актуальности поставленных вопросов, что позволяет надеяться на интересную и вдохновляющую на новые поиски конференцию.

Все доклады, вошедшие в сборник, опубликованы в авторской редакции.

*проф. д.г.-м.н. Е.А. Вознесенский,
директор ИГЭ РАН*

1. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ГРУНТОВЕДЕНИЯ

ЭНЕРГОЭНТРОПИЯ НАБУХАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Ф.Г. Габиров

Азербайджанский научно-исследовательский институт строительства и архитектуры, Азербайджан, г. Баку.
E-mail: farchad@yandex.ru

Набухающие глинистые грунты распространены на всех континентах, кроме Антарктиды. Многие виды различных сооружений, к которым относятся: промышленные и гражданские здания малой этажности, транспортные сооружения, трубопроводы, гидротехнические и природоохранные сооружения подвергаются негативному воздействию набухающих глинистых грунтов при их неравномерном аварийном увлажнении. В связи с этим разработка эффективных методов изучения и прогнозирования изменения напряженно-деформированного состояния глинистых набухающих грунтов в контактной зоне с фундаментами и конструкциями различных сооружений для разработки защитных мероприятий от указанного негативного процесса является актуальной проблемой геотехники.

Исследованию деформаций набухающих глинистых грунтов и сооружений, построенных на них посвящены работы G.Y.Cromko [1], S.G.Fityuş, D.W.Smith, M.A.Allman [2], Л.В.Передадьского и В.П.Ананьева [3], А.А.Мустафаева [4], Л.И.Кульчицкого и О.Г.Усьярова [5], В.И.Осипова и В.Н.Сokolova [6], F.H.Chen [7], J.D.Nelson, D.J.Miller [8], Е.А.Сорочана [9], R.W.Day [10], Ф.Г.Габилова [11, 12] и других.

Ввиду того, что природный ультрамелкодисперсный глинистый грунт является многокомпонентной гетерогенной системой, то для изучения напряженно-деформированного состояния при его увлажнении целесообразно использование уже отработанных на других сложных системах аналитических методов теоретической термодинамики (в нашем случае энергоэнтропии).

Элементарная работа силы F с компонентами в процессе проникновения (воздействия) энергоактивной воды в глинистый грунт, на бесконечно малом пути dc с компонентами dx , dy , dz выражается в виде

$$dA = F_x dx + F_y dy + F_z dz. \quad (1)$$

Представим себе элементарный образец глинистого грунта (Рис. 1) который при его увлажнении энергоактивной водой будет расширяться (набухать) под воздействием давления набухания, имеющего осмотическую природу. Найдем для этого случая выражение элементарной работы. Выделим на поверхности образца грунта элементарную малую площадку dS . На нее действует внутренняя сила до dS , равная давлению набухания глинистого грунта.

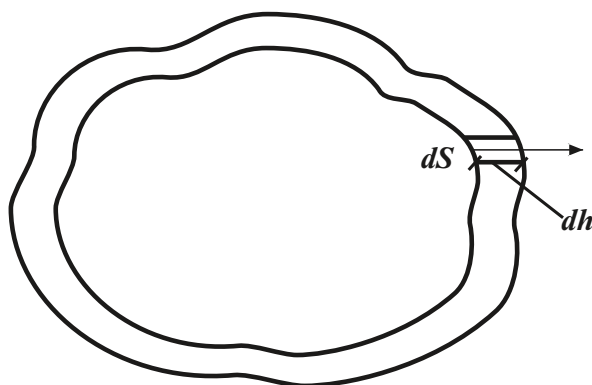


Рис. 1. Схема набухания элементарного образца глинистого грунта

При элементарном набухании образца глинистого грунта элементарная площадка dS сместится на расстояние dh по нормали n к площадке. Применения обычное выражение элементарной работы, когда направления силы и перемещения (по нормали) совпадают, можно написать

$$dA = p dS dh. \quad (2)$$

Общая элементарная работа набухания глинистого грунта равна сумме по всей поверхности образца глинистого грунта:

$$dA = \int_s p dS dh. \quad (3)$$

Но $dS dh$ есть бесконечно малое приращение объема образца глинистого грунта у элемента поверхности образца dS . Интеграл по всей поверхности образца глинистого грунта можно рассматривать как элементарную работу набухания при бесконечно малом увеличении объема dV , когда давление набухания p можно считать постоянной величиной, т.е.

$$dA = p \int_s dS dh = p dV. \quad (4)$$

Полная работа образца глинистого грунта при его набухании от начального объема V_1 до конечного объема V_2 равна сумме элементарных работ:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV. \quad (5)$$

Перспективность использования температурно-влажностной аналогии при исследовании напряженно-деформированного состояния набухающих глинистых грунтов показана в работах М.Н. Гольдштейна [13], Н.А. Цытовича и З.Г. Тер-Мартirosяна [14] и др.

Для изучения изменения напряженно-деформационного состояния при набухании глинистых грунтов принято решение использовать современный общенаучный метод исследований – энергоэнтروпийный.

Универсальность «энергоэнтропики» основывается на замечательном факте, заключающемся в том, что во всех макроскопических системах материального мира практически непрерывно происходят изменения количеств энергии и энтропии, изучая которые можно получить необходимые данные о закономерностях функционирования и развития этих систем [15].

При механических воздействиях и увлажнении в набухающем влагоупругом глинистом грунте возникают поля перемещений u_i , деформаций ε_{ij} и напряжений σ_{ij} , а также влажностное поле W .

Величины u_i , ε_{ij} , σ_{ij} и W в общем случае являются функциями координат x_i и времени t . Так как вода распространяется в глинистом грунте посредством влагопроводности, то для изучения процесса влагоупругого деформирования даже идеального упругого грунта должна быть привлечена термодинамика необратимых процессов.

Энергоэнтропийная теория необратимого процесса влагоупругого деформирования изотропного глинистого грунта базируется на трёх основных положениях.

Первое положение состоит в том, что изменение энтропии за определённый промежуток времени определяется выражением

$$dS = d_e S + d_i S = \frac{dQ}{W} + d_i S, \quad (6)$$

где $d_e S$ и dQ – соответственно энтропия и энергоактивная вода, сообщённая глинистому грунту из окружающей среды; $d_i S$ – энтропия, которая возникает в результате необратимого процесса и является всегда положительной величиной.

Второе положение основано на предположении о локальном энергоэнтропийном равновесии и сводится к тому, что мгновенные значения энергоэнтропийных функций являются однозначными функциями энергоэнтропийных параметров. Из этого вытекает, что основные уравнения классической термодинамики (энергоэнтропики)

$$dL + dQ = dK + dU, \quad (7)$$

$$dS = \frac{dQ}{W}, \quad (8)$$

где dL – работа, совершённая внешними силами над системой; dK и dU – соответственно кинетическая энергия макроскопического движения глинистого грунта и его внутренняя энергия, увеличивающиеся при увлажнении и набухании; W – абсолютная влажность или влагосодержание глинистого грунта; справедливы и для локально равновесных макроскопических частей глинистой грунтовой системы.

Вводя в рассмотрение плотность водного потока (количество воды, проходящее за единицу времени и отнесенное к единице площади поверхности грунта), представляемого вектором \vec{q} с компонентами q_i и, связывая его со скоростью подводимой удельной энергоактивной влаги \dot{Q}

$$-q_{i,i} = \dot{Q} - w_o, \quad (9)$$

а также, заменяя разность скоростей $\dot{L} - \dot{K}$, отнесенную к единице объёма глинистого грунта, скоростью удельной работы деформации

$$\dot{A} = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (10)$$

первый и второй законы энергоэнтропика для изотропного влагоупругого набухающего глинистого грунта можно записать в виде:

$$-q_{ij} + w_o = W \dot{S} = \dot{U} - \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (11)$$

где S и U – объёмные плотности энтропии и внутренней энергии; w_o – удельная мощность (количество энергоактивной воды, физико-химически проявляющая себя в единице объёма набухающего глинистого грунта за единицу времени) источников увлажнения.

Третье положение является феноменологическим законом, описывающим необратимый процесс влагопроводности – законом о пропорциональности вектора энергоактивной воды градиенту влажности

$$q_i = -\lambda_q W_{,i}, \quad (12)$$

где λ_q – коэффициент влагопроводности. Этот закон установлен в предположении, что скорость распространения энергоактивной воды бесконечно велика. Уравнение влагопроводности, учитывающее конечность скорости распространения энергоактивной воды, имеет вид

$$q_i = -\lambda_q W_{,i} - \tau \dot{q}_i, \quad (13)$$

где τ – время релаксации потока энергоактивной воды.

На основании уравнений (11) и (12) основное положение энергоэнтропика необратимых процессов об образовании энтропии как положительной величины для набухающих глинистых грунтов, описывается следующим выражением:

$$\dot{S} = -\frac{q_{i,i}}{W} + \frac{w_o}{W} = \dot{S}_e + \dot{S}_i, \quad (14)$$

где \dot{S}_e – приращение энтропии в единицу времени, обусловленное поступлением энергоактивной воды из окружающей среды и внутренних источников увлажнения,

$$\dot{S}_e = -\left(\frac{q_i}{W}\right)_i + \frac{w_o}{W}, \quad (15)$$

\dot{S}_i – локальное образование энтропии в единицу времени в результате необратимого процесса влагопроводности,

$$\dot{S}_i = -\frac{1}{W^2} q_i W_i = \frac{1}{W^2} \cdot \frac{q_i q_i}{\lambda_q} > 0. \quad (16)$$

При исследовании энергоэнтропии деформирования набухающего глинистого грунта, кроме плотности внутренней энергии U и плотности энтропии S , вводятся следующие энергоэнтропийные функции: плотность свободной энергии:

$$F = U - WS \quad (17)$$

и плотность энергоэнтропийного потенциала Гиббса:

$$G = F - \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}, \quad (18)$$

где U, F, G – функции состояния, приращения их при изменении состояния упругого глинистого грунта – полные дифференциалы. Эти функции называются энергоэнтропийными потенциалами.

Исходя из выражения:

$$dU = WdS + \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}, \quad (19)$$

с помощью уравнений (16) и (17) находим:

$$dF = -SdW + \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}; \quad (20)$$

$$dG = -SdW + \varepsilon_{ij} d\sigma_{ij}. \quad (21)$$

Так как dU, dF и dG – полные дифференциалы, то

$$\frac{\partial U}{\partial S} = W, \quad \frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sigma_{ij}; \quad (22)$$

$$\frac{\partial F}{\partial W} = -S, \quad \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sigma_{ij}; \quad (23)$$

$$\frac{\partial G}{\partial W} = -S, \quad \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} = \varepsilon_{ij}. \quad (24)$$

Пусть набухающий глинистый грунт в исходном недеформированном состоянии имеет влажность W_o - const. Предполагаем, что приращение влажности глинистого грунта $W-W_o$ является

таким, при котором чисто набухание $\int_{W_o}^W \alpha dW$, где α – истинный коэффициент линейного набухания

глинистого грунта, имеет величину одного порядка малости по сравнению с ε_{ij} . Это предположение не противоречит основным положениями линейной теории упругости о малости деформаций и позволяет отказаться от ограничения $\frac{W-W_o}{W_o} \ll 1$.

Разлагаем функцию F в ряд Тейлора по степеням ε_{ij} с коэффициентами, зависящими от W .

В качестве независимых энергоэнтропийных параметров вместо компонентов тензора деформаций целесообразно ввести первые два его инварианта.

После некоторых преобразований определим функцию $F(0, 0, W)$ через удельную объёмную влажёмкость глинистого грунта при отсутствии деформации. Произведя некоторые математические операции, определяем, что

$$\delta_H = \varepsilon_{kk} = 3 \int_{W_o}^W \alpha dW = -\frac{3}{3\lambda + 2\mu} \frac{\partial F(0,0,W)}{\partial J_1}. \quad (25)$$

Из (25) следует, что

$$\frac{\partial F(0,0,W)}{\partial J_1} = -(3\lambda + 2\mu)\alpha_W(W - W_o), \quad (26)$$

где α_W – средний коэффициент линейного набухания глинистого грунта в интервале влажностей (W_o, W) , определяемый выражением:

$$\alpha_W = \frac{1}{W - W_o} \int_{W_o}^W \alpha dW. \quad (27)$$

Определяем выражение плотности свободной энергии F и энтропии S :

$$F = \frac{\lambda}{2} \varepsilon_{kk}^2 + \mu \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_W(W - W_o)\varepsilon_{kk} - \int_{W_o}^W dW \int_{W_o}^W \frac{c_{\varepsilon=0}}{W} dW; \quad (28)$$

$$S = -\frac{1}{2} \frac{\partial \lambda}{\partial W} \varepsilon_{kk}^2 - \frac{\partial \mu}{\partial W} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij} + \frac{\partial}{\partial W} [(3\lambda + 2\mu)\alpha_W(W - W_o)] \varepsilon_{kk} + \int_{W_o}^W \frac{c_{\varepsilon=0}}{W} dW, \quad (29)$$

где $c_{\varepsilon=0}$ – удельная объёмная влагоёмкость при отсутствии деформации.

Произведя некоторые преобразования, находим плотность энергoэнтропийного потенциала Гиббса:

$$G = -\frac{1+\nu}{2E} \sigma_{ij} \sigma_{ij} + \frac{\nu}{2E} \sigma_{kk}^2 - \alpha_W(W - W_o)\sigma_{kk} - \frac{3E}{2(1-2\nu)} \alpha_W^2(W - W_o)^2 - \int_{W_o}^W dW \int_{W_o}^W \frac{c_{\varepsilon=0}}{W} dW. \quad (30)$$

Находим плотность внутренней энергии:

$$U = \frac{1}{2} \left(\lambda - W \frac{\partial \lambda}{\partial W} \right) \varepsilon_{kk}^2 + \left(\mu - W \frac{\partial \mu}{\partial W} \right) \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij} - \left\{ (3\lambda + 2\mu)\alpha_W(W - W_o) - W \frac{\partial}{\partial W} [(3\lambda + 2\mu)\alpha_W(W - W_o)] \right\} \varepsilon_{kk} + c_W(W - W_o), \quad (31)$$

где c_W – средняя удельная влагоёмкость глинистого грунта при отсутствии деформаций в интервале влажности (W_o, W) ,

$$c_W = \frac{1}{W - W_o} \int_{W_o}^W c_{\varepsilon=0} dW. \quad (32)$$

Зная плотность энтропии, находим обобщённое уравнение влагопроводности набухающего глинистого грунта:

$$\left(\lambda_q W_i \right)_i + w_o = WS, \quad (33)$$

S определяется выражением (29).

Рассмотрим случай незначительного увлажнения набухающего глинистого грунта. В этом случае:

$$\frac{W - W_o}{W_o} \ll 1, \quad (34)$$

а упругие коэффициенты Ляме (λ, μ) , коэффициенты линейного набухания грунта α_W влагопровод-

ности λ_Q и удельной влагоёмкости $c_{\sigma=0}$ и $c_{\varepsilon=0}$ можно считать не зависящими от влажности грунта; вместо этих влагоёмкостей можно рассматривать удельную влагоёмкость соответственно при постоянном тензоре напряжения c_σ и при постоянном тензоре деформации c_ε . В этом случае:

$$c_\sigma - c_\varepsilon = \frac{3E\alpha_W^2 W}{1-2\nu} = 3(3\lambda + 2\mu)\alpha_W^2 W. \quad (35)$$

Обобщенное уравнение влагопроводности принимает вид:

$$S = (3\lambda + 2\mu)\alpha_W \varepsilon_{kk} + c_\varepsilon \ln \frac{W}{W_o}; \quad (36)$$

$$U = \frac{\lambda}{2} \varepsilon_{kk}^2 + \mu \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij} + (3\lambda + 2\mu)\alpha_W W_o \varepsilon_{kk} + c_\varepsilon (W - W_o); \quad (37)$$

$$\lambda_Q W_{i,i} + w_o = c_\varepsilon \dot{W} + (3\lambda + 2\mu)\alpha_W W_o \dot{\varepsilon}_{kk}. \quad (38)$$

При $\frac{W - W_o}{W_o} \ll 1$ значения упругих и увлажнительных коэффициентов и удельных влагоёмкостей предполагаются постоянными, вместо уравнения (33) применяется уравнение влагопроводности (38), и связанная задача влагуупругости становится линейной.

Составим для этой задачи уравнения движения в перемещениях: ε_{kk} и W , сохраняются только при $i=j$, получаем:

$$2\mu \varepsilon_{ij,j} + \lambda \varepsilon_{kk,i} + F_i - (3\lambda + 2\mu)\alpha_W (W - W_o)_i - \rho \ddot{u}_k = 0. \quad (39)$$

Заменяя j неммым индексом k и, учитывая, что

$$u_{k,ik} = u_{k,ki}, \quad (40)$$

находим

$$\mu u_{i,kk} + (\lambda + \mu)u_{k,ki} + F_i - (3\lambda + 2\mu)\alpha_W (W - W_o)_i - \rho \ddot{u}_i = 0. \quad (41)$$

Представим эти уравнения в векторной форме:

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \vec{u} + \vec{F} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_W \text{grad}(W - W_o) - \rho \ddot{\vec{u}} = 0, \quad (42)$$

$$\nabla^2 W + \frac{w_o}{\lambda_Q} - \frac{1}{a} W - \frac{(3\lambda + 2\mu)\alpha_W W_o}{\lambda_Q} \text{div } \vec{u} = 0, \quad (43)$$

где $a = \lambda_Q / c_\varepsilon$ – коэффициент влажностепроводности набухающего глинистого грунта.

Для постановки задачи влагуупругости набухающего глинистого грунта в перемещениях, используется уравнение без инерционного члена:

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \vec{u} + \vec{F} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_W \text{grad}(W - W_o) = 0. \quad (44)$$

В этом уравнении функция $W - W_o$ предполагается известной из решения соответствующей задачи влагопроводности.

Граничные условия могут быть заданы в перемещениях

$$u_i = g(x_k), \quad (45)$$

или в напряжениях

$$\sigma_{ij}n_j = f_i(x_k). \quad (46)$$

Общее решение уравнения (43) имеет вид:

$$\vec{u} = \vec{u} + \vec{u}^{(F)} + \vec{u}^{(w)}, \quad (47)$$

где \vec{u} – общее решение однородного уравнения; $\vec{u}^{(F)}$ – частное решение неоднородного уравнения (44) при $W=W_o$; $\vec{u}^{(w)}$ – частное решение его при $\vec{F}=0$.

Общее решение однородного уравнения \vec{u} найдено П.Ф.Панковичем в следующем виде:

$$\vec{u} = 4(1-\nu)\vec{B} - \text{grad} \left(\vec{B} \cdot \vec{r} + B_o \right), \quad (48)$$

где \vec{r} – радиус вектор; \vec{B} и B_o – гармонический вектор и скаляр, т.е.

$$\nabla^2 \vec{B} = 0, \quad \nabla^2 B_o = 0. \quad (49)$$

Если объёмные силы имеют потенциал Π :

$$\vec{F} = \text{grad} \Pi, \quad (50)$$

то частное решение $\vec{u}^{(F)}$ находится в теории упругости в виде:

$$\vec{u}^{(F)} = \text{grad} \Phi^{(F)}, \quad (51)$$

где скалярная функция $\Phi^{(F)}$ удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\nabla^2 \Phi^{(F)} = -\frac{\Pi}{\lambda + 2\mu}. \quad (52)$$

Сравнения (51) с влажностным членом уравнения (44) позволяет найти частное решение $\vec{u}^{(w)}$ в таком же виде:

$$\vec{u}^{(w)} = \text{grad} \Phi, \quad (53)$$

где скалярная функция Φ является решением уравнения Пуассона

$$\nabla^2 \Phi = \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + 2\mu} \alpha_w (W - W_o) = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \alpha_w (W - W_o). \quad (54)$$

Функцию Φ назовем влагоупругим потенциалом перемещений.

При решении задач влагоупругости набухающего глинистого грунта, в которых граничные условия заданы в напряжениях, удобно пользоваться системой уравнений в напряжениях.

Выводы:

1. Выявлена перспективность использования аналитических методов энергоэнтропии при изучении напряженно-деформированного состояния набухающих глинистых грунтов при их увлажнении.
2. Описан процесс набухания элементарного объема глинистого грунта при его увлажнении. Получена формула, описывающая полную работу образца при его набухании.
3. Рассмотрены основные теоретические исследования энергоэнтропии в связи с влагоупругим деформированием набухающих глинистых грунтов. При выводе основных уравнений энергоэнтропии набухающих глинистых грунтов вводится определяющий физико-химический потенциал энергоактивной воды.

4. На основе теоретических исследований получено выражение деформации набухания с использованием коэффициента линейного набухания глинистого грунта. Путем определения плотности свободной энергии и энтропии получено уравнение влагопроводности. Полученные уравнения позволят более эффективно прогнозировать напряженно-деформированное состояние набухающего глинистого грунта в различных сложных геотехнических ситуациях.

Литература

1. Gromko G.J. Review of expansive soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division (ASCE)* 100 (6), 1974, p.667-687.
2. Fityus S.G., Smith D.W., Allman M.A. Expansive soil test site near Newcastle. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*: 130 (7), 2004, p.686-695.
3. Передельский Л.В., Ананьев В.П. Набухающие глинистые грунты Северного Кавказа. Ростов-на-Дону, Издательство Ростовского университета, 1987, 144 с.
4. Мустафаев А.А. Фундаменты на просадочных и набухающих грунтах. М.: Высшая школа, 1989, 590 с.
5. Кульчицкий Л.И., Усъяров О.Г. Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород. М.: Недра, 1981, 178 с.
6. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. М.: ГЕОС, 2013, 576 с.
7. Chen F.H. *Foundation on expansive soils*. New York: Elsevier, 1988.
8. Nelson J.D., Miller D.J. *Expansive soils: Problems and practice in foundation and pavement engineering*. New York: Wiley, 1992.
9. Сорочан Е.А. *Строительство сооружений на набухающих грунтах*. М.: Стройиздат, 1989, 312 с.
10. Day R.W. *Foundation engineering handbook: Design and construction with the 2009 International Building Code*. New York: McGraw Hill, 2010.
11. Габибов Ф.Г. Теория и практика улучшения свойств структурно-неустойчивых глинистых грунтов при решении геотехнических и инженерно-геоэкологических проблем. Баку: Элм, 2011, 422 с.
12. Габибов Ф.Г. Геомеханика. Геотехника. Избранные труды. Saarbrucken (Германия): LAMBERT, 2016, 347 с.
13. Гольдштейн М.Н. *Механические свойства грунтов*. М.: Издательство литературы по строительству, 1971, 368 с.
14. Цытович Н.А., Тер-Мартirosян З.Г. *Основы прикладной геомеханики в строительстве*. М.: Высшая школа, 1981, 317 с.
15. Алексеев Г.Н. *Энергоэнтропика*. М.: Издательство «Знание», 1983, 192 с.

СВОЙСТВА ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ С ПОЗИЦИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ

Ф.С. Карпенко

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия.
E-mail: kafs08@bk.ru

Глинистые породы наиболее широко распространены среди всех осадочных пород земной коры; они чаще других пород используются в качестве основания и материала для строительства, что определяет важность объективного и достоверного определения их свойств при проведении инженерно-геологических изысканий, наибольшее практическое значение среди которых имеют механические свойства, прочность и деформируемость. В настоящее время для определения свойств глинистых грунтов используется общепринятый комплекс практических методик испытаний, в основе которого лежат фундаментальные положения классической механики сплошных сред – теории трения, пластичности и упругости. Методики испытаний аналогичны как в отечественной, так и в зарубежной практике грунтоведения, и закреплены ведущими нормативными документами.

В целом, прочность и деформируемость грунтов определяются как механические свойства материалов, и это в общем случае позволяет решать множество практических задач при проведении инженерно-геологических изысканий. Наряду с этим, за время исследований выявлено множество противоречий теоретических положений и расчетов с реальным поведением глинистых грунтов под действием нагрузок, что в значительной степени связано с изменением их строения в ходе проведения испытаний [1–3, 13 и др.].

Основная причина возникающих противоречий заключается в том, что с позиций современной научно-методической базы исследований глинистые грунты рассматриваются как сплошные упругие тела, а внутреннее строение глин и их реакция на действие внешних нагрузок не учитываются. В результате параметры прочности и деформируемости глинистых грунтов не имеют четкого понятийного смысла, характеризующего строение и свойства конкретного грунта, во многом их физический смысл оказывается условным, размытым, а величина зависит от прилагаемых нагрузок, метода и схемы проведения испытаний и других условий.

Современная методическая база определения механических свойств глинистых грунтов позволяет определять и фиксировать существующие противоречия, но, в целом, вопрос об их причинах и закономерностях проявления остается дискуссионным. Все это формирует предпосылки для разработки нового научно-методического направления изучения глинистых грунтов, основанного на современных научных представлениях об условиях их образования, закономерностях формирования и изменения строения и свойств.

В основе современных научных представлений о строении глин лежит рассмотрение их как дисперсных систем, сложенных частицами глинистых минералов, дисперсной фазой и водой, слагающей дисперсионную среду. Эти представления базируются на положениях фундаментальных теорий ДЛФО, ДЭС, теории контактных взаимодействий П.А. Ребиндера и теории расклинивающего действия Б.В. Дерягина. Эти базовые теории коллоидной и физической химии были развиты применительно к глинистым дисперсным грунтам В.И. Осиповым, В.Н. Соколовым, Н.А. Румянцевой [10–12] и другими учеными и послужили основой физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах. Эта теория описывает структурообразование глин за счет возникновения физико-химических связей в результате действия сил притяжения и отталкивания между частицами глинистых минералов и взаимодействия с водой в ходе литогенеза, приводящего к формированию структурных контактов между минеральными частицами.

Общая характеристика энергетического взаимодействия в дисперсных системах, разработанная в рамках теории ДЛФО, отображается зависимостью результирующей величины действия сил притяжения и отталкивания частиц дисперсной фазы от расстояния между ними. Функция энергетического взаимодействия имеет два потенциальных минимума, отвечающих наиболее устойчивому и энергетически выгодному состоянию системы, разделенных и ограниченных энергетическими максимумами. Внешние напряжения, действующие на грунт, передаются на площадки контактов

и концентрируются там, а общая прочность глинистой дисперсной системы определяется суммарной прочностью отдельных контактов. Для ее характеристики В.И. Осиповым [11] были введены понятия реальной и общей эффективной прочности. Реальная эффективная прочность характеризует силу взаимодействия между частицами и определяется, как величина реального эффективного напряжения σ'' на контактах при их разрушении. Реальная эффективная прочность контактов, расклинивающее давление гидратных пленок и сжимающие капиллярные силы, действующие в неводонасыщенных грунтах, суммарно определяют общую эффективную прочность глинистого грунта – напряжение σ' , при достижении которого на контактах частиц происходит разрушение структурных связей между ними.

В естественных условиях дисперсная система находится в наиболее устойчивом энергетическом положении, соответствующем условиям потенциального минимума. При приложении нагрузки на структурные контакты энергетическое положение системы начинает смещаться по траектории, описываемой кривой энергетического взаимодействия, в сторону уменьшения расстояния между частицами. В зависимости от величины нагрузки система может оставаться в зоне преобладания сил притяжения между частицами, либо перемещаться в зону преобладания сил отталкивания. В первом случае при снятии нагрузки силы притяжения будут стремиться вернуть систему в исходное равновесное состояние. Для дисперсных систем глинистых грунтов это соответствует условиям проявления ими деформационных свойств и определяет предел нагрузок, при которых они должны определяться. Аналогично реальной эффективной прочности, он может быть назван реальной эффективной деформируемостью.

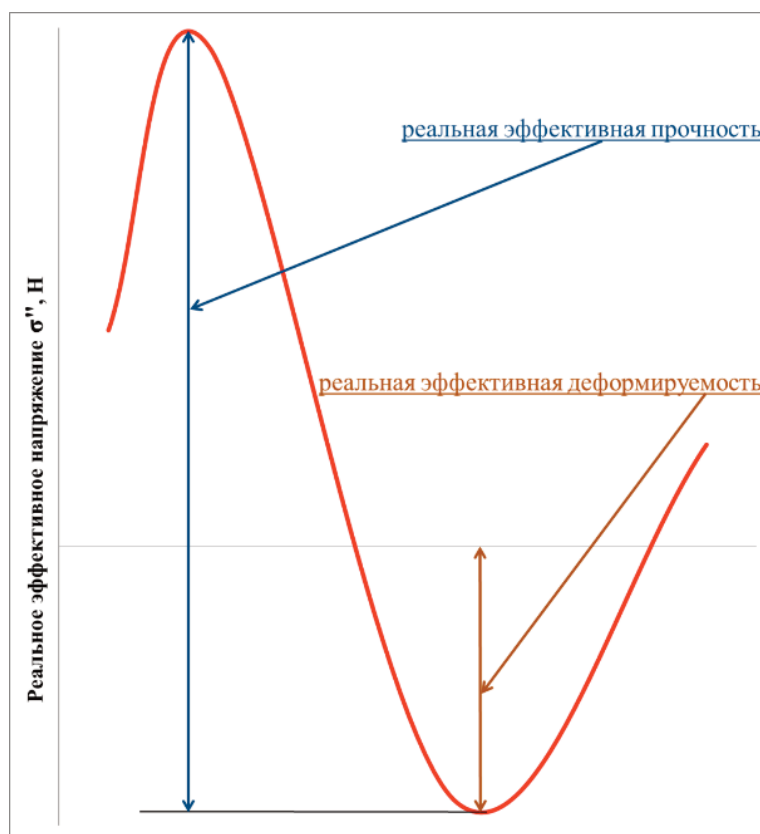


Рис. 1. Определение реальной эффективной прочности и реальной эффективной деформируемости глин.

Величина общей эффективной прочности σ' для различных разновидностей глинистых грунтов, определенная экспериментально [5], закономерно снижается, как показано на Рис. 2, в ряду: тяжелые глины – легкие глины – тяжелые суглинки – легкие суглинки – супеси, и, наряду с этим, снижается по мере увеличения влаги в грунте. Это свидетельствует, что величина общей эффективной прочности зависит от минерального состава грунта, количества глинистых частиц, а, следовательно, и контактов между ними, и толщины гидратных пленок частиц. Наиболее резкое скачкообразное из-

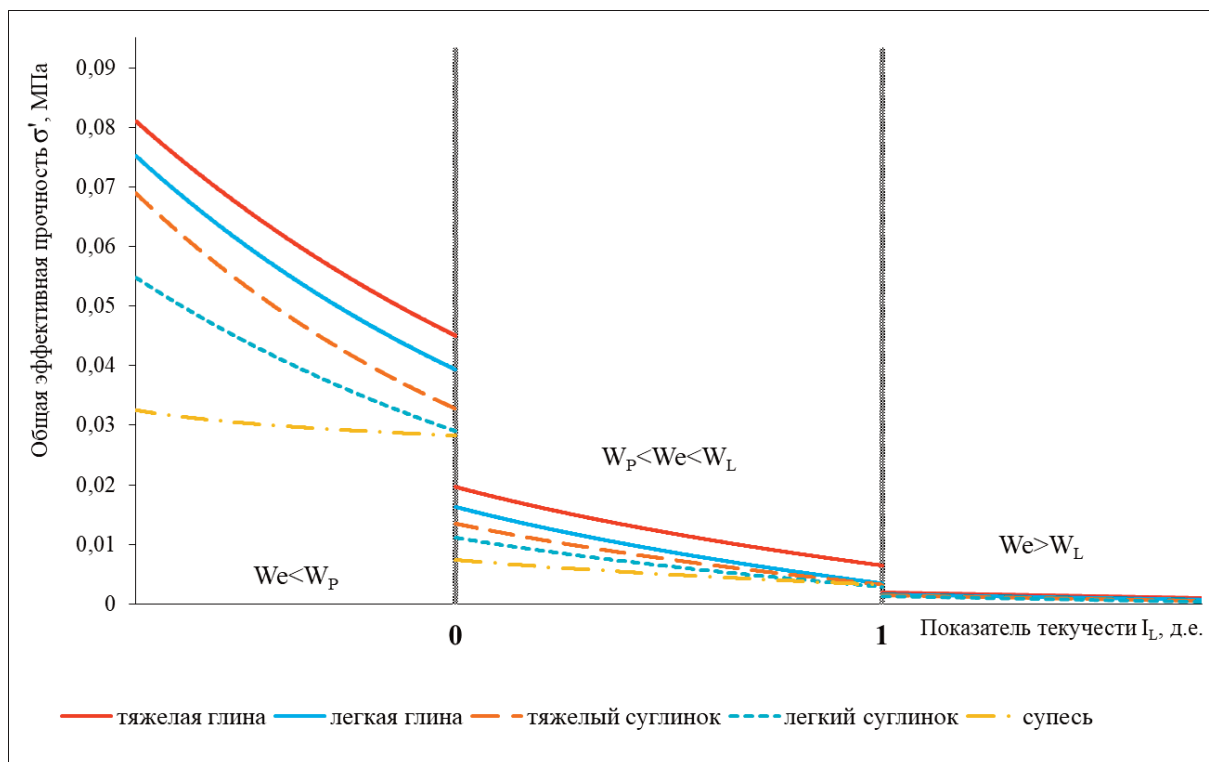


Рис. 2. Зависимость общей эффективной прочности σ' глинистых грунтов от содержания в них влаги.

менение величины σ' происходит на двух участках, соответствующих влажности грунтов, равной пределу пластичности W_p и пределу текучести W_L . Это показывает, что переход глинистых грунтов из текучего в пластичное и из пластичного в твердое состояние, происходящий при таких значениях влажности, имеет физико-химическую природу и обусловлен изменением преобладающего типа структурных контактов в них, соответственно, дальнего коагуляционного, ближнего коагуляционного и переходного точечного.

Закономерность изменения реальной эффективной прочности (Рис. 3) и реальной эффективной деформируемости (Рис. 4) носит характер, аналогичный общей эффективной прочности, и их величины для разновидностей глинистых грунтов, определенные экспериментальным путем [6, 7], приведены в таблице 1.

Приведенные данные характеризуют предельные значения реальных эффективных напряжений σ на контактах глинистых грунтов, определяющие условия проявления их прочностных и деформационных свойств. Для каждой разновидности глинистого грунта, в зависимости от преобладающего типа контактных взаимодействий в нем, могут быть определены три уровня напряжений, показанные на Рис. 5, при превышении реальным эффективным напряжением каждого из которых происходит резкое изменение строения и свойств грунта. Это уровень реальной эффективной деформируемости, реальной эффективной прочности и предельных напряжений по закону Мора–Кулона.

В условиях нагружения, при которых величина реального эффективного напряжения не превышает реальную эффективную деформируемость (линия 1 на Рис. 5), преобладающие силы притяжения на контактах препятствуют перемещению частиц и направлены на возвращение дисперсной глинистой системы в исходное наиболее устойчивое равновесное энергетическое состояние потенциального минимума.

При увеличении нагрузки выше уровня реальной эффективной деформируемости дисперсная глинистая система попадает в зону преобладающего действия сил отталкивания на контактах. Действие сил отталкивания способствует перемещению и переориентации частиц, сжатию и утоньшению их гидратных пленок, и при достижении реальным эффективным напряжением величины реальной эффективной прочности (линия 2 на Рис. 5) происходит разрушение контактов.

Линия 3 на Рис. 5 соответствует величине прочности грунта, определенной в соответствии с законом Мора–Кулона, то есть уровню предельных нагрузок на грунт, при которых происходит его физическое разрушение как сплошного тела.

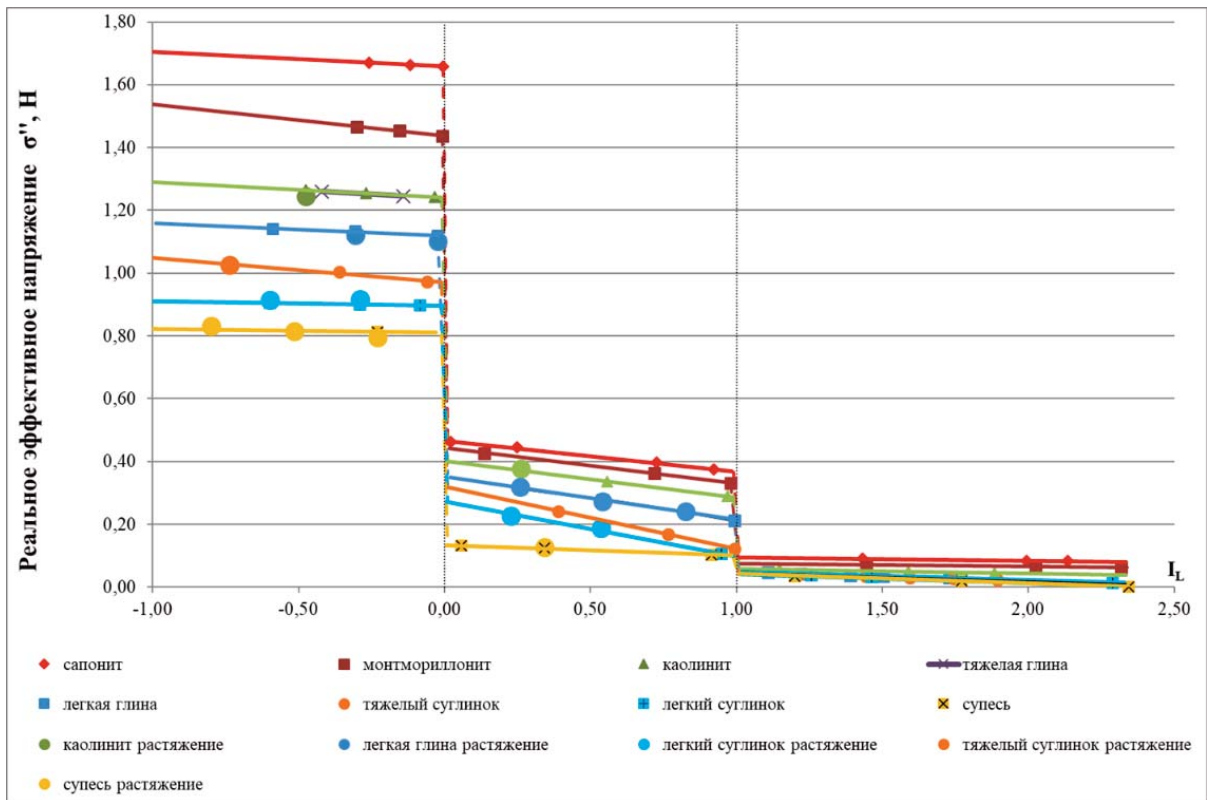


Рис. 3. Зависимость реальной эффективной прочности (реальное эффективное напряжения σ' в единичном объеме) глинистых грунтов от содержания в них влаги.

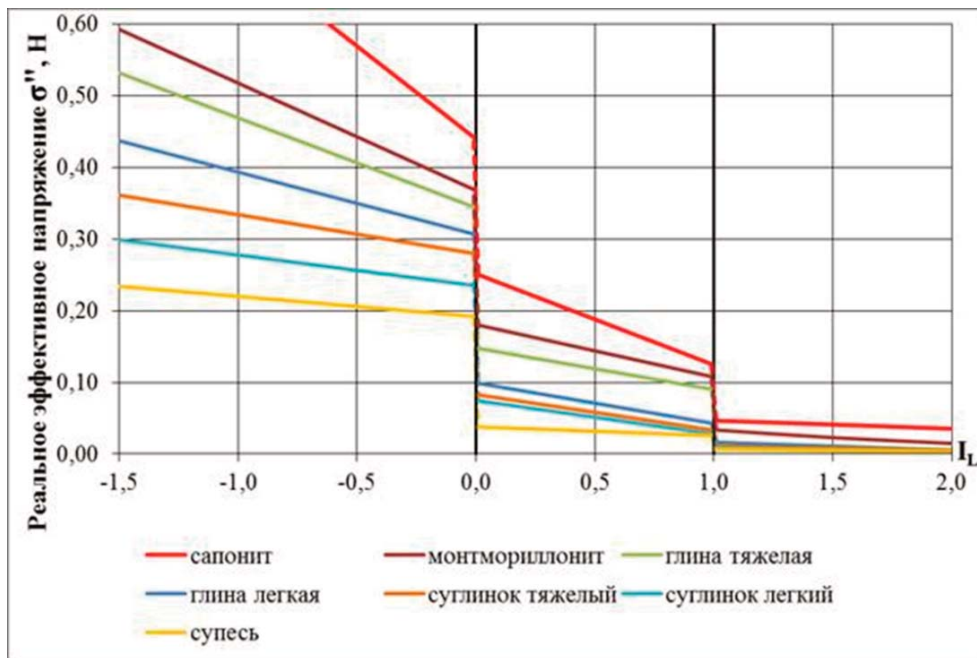


Рис. 4. Зависимость реальной эффективной деформируемости (реальное эффективное напряжения σ' в единичном объеме) глинистых грунтов от содержания в них влаги.

Величина реальной эффективной деформируемости и реальной эффективной прочности для каждого грунта может быть практически определена как реальное эффективное напряжение σ' на контактах в грунте, при превышении которого происходит, соответственно, переход дисперсной глинистой системы из условий преобладающего действия сил притяжения между частицами в условия преобладания сил отталкивания (деформирование) и разрушение структурных связей (проч-

Таблица 1.

Реальная эффективная прочность и деформируемость контактов разновидностей глинистых грунтов				
Преобладающий минеральный состав глинистой фракции	Разновидность грунта по числу пластичности	В числителе – реальная эффективная прочность, в знаменателе – реальная эффективная деформируемость единичного контакта преобладающего типа, Н		
		переходного точечного	ближнего коагуляционного	дальнего коагуляционного
сапонит	Глина тяжелая	$\frac{1.9 \cdot 10^{-09}}{6.4 \cdot 10^{-10}}$	$\frac{4.7 \cdot 10^{-10}}{2.1 \cdot 10^{-10}}$	$\frac{9.7 \cdot 10^{-11}}{4.6 \cdot 10^{-11}}$
монтмориллонит		$\frac{1.7 \cdot 10^{-09}}{5.4 \cdot 10^{-10}}$	$\frac{4.3 \cdot 10^{-10}}{1.7 \cdot 10^{-10}}$	$\frac{7.7 \cdot 10^{-11}}{2.6 \cdot 10^{-11}}$
каолинит, иллит	Глина легкая	$\frac{1.4 \cdot 10^{-09}}{4.7 \cdot 10^{-10}}$	$\frac{3.1 \cdot 10^{-10}}{1.0 \cdot 10^{-10}}$	$\frac{4.3 \cdot 10^{-11}}{1.5 \cdot 10^{-11}}$
	суглинок тяжелый			
	суглинок легкий			
	супесь			

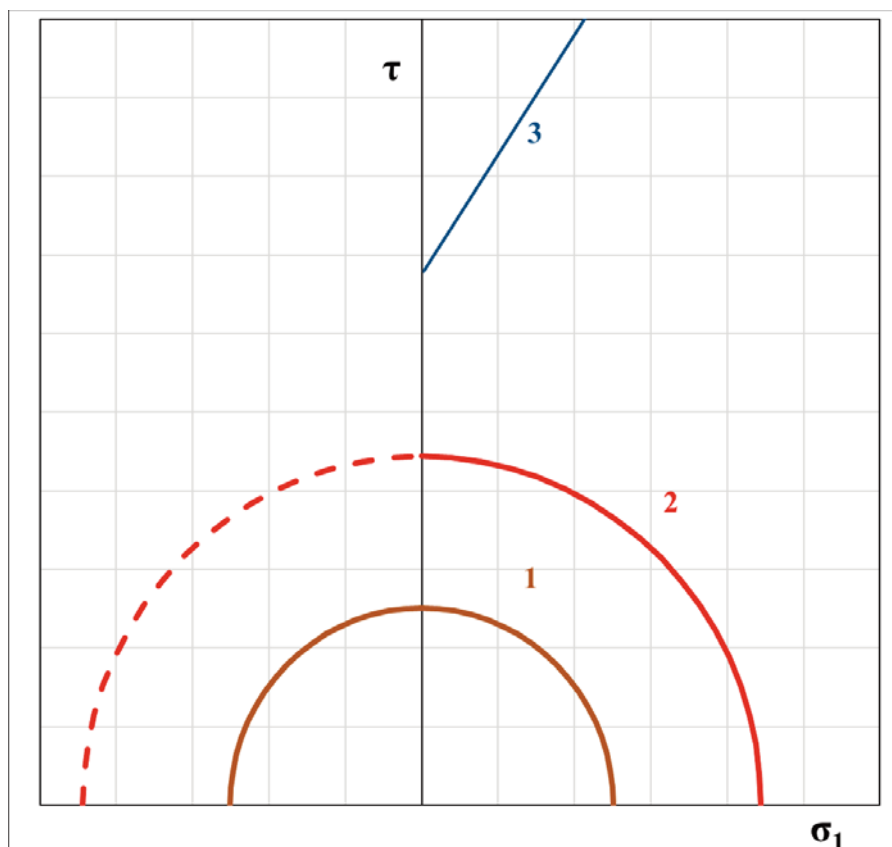


Рис. 5. Уровень напряжений в глинистых грунтах: 1 – реальная эффективная деформируемость; 2 – реальная эффективная прочность; 3 – предельное напряжение по закону Мора–Кулона.

ность). Значение реальной эффективной деформируемости и прочности, постоянное для каждой разновидности грунта, определяется величиной нормального (σ_1), касательного (τ), порового (σ_w) давления, расклинивающего действия гидратных пленок (Πh) и описывается условием: $\sigma'' = \sigma_1 + \tau - \sigma_w - \Pi h = \text{const}$. Величина реальной эффективной прочности глинистого грунта связана с его

прочностными характеристиками, определяемыми по закону Мора–Кулона, угла внутреннего трения (φ) и сцепления (C). Эта взаимосвязь описывается соотношением: $\sigma'' = C \cdot \text{ctg}\varphi$, соответствующим формуле определения величины структурного сцепления, предложенной Н.Н. Масловым [8, 9].

Приведенные данные характеризуют величины реальных эффективных напряжений в глинистых грунтах, при достижении которых внешней нагрузкой происходит резкое изменение энергетического баланса сил взаимодействия на контактах и, следовательно, строения и свойств грунтов. Такие изменения не происходят скачкообразно, поэтому для достоверной оценки описанных изменений необходимо рассматривать процессы, происходящие в глинах при действии «промежуточных» нагрузок, величина которых находится между предельными напряжениями.

В условиях нагружения, при которых реальные эффективные напряжения не превышают уровень реальной эффективной деформируемости, преобладающие силы притяжения между частицами препятствуют деформированию грунта и направлены на возвращение дисперсной системы в исходное равновесное энергетическое состояние. Деформация грунта в этом случае может происходить лишь при постоянном нарастании внешней нагрузки, при снятии которой грунт стремится к возвращению в первоначальное состояние, то есть в нем протекает упругая деформация.

При стабилизации действия внешней нагрузки на этом уровне силы притяжения так же стремятся вернуть грунт в исходное состояние. В этом случае, в зависимости от соотношения реальной эффективной прочности грунта и величины реальных эффективных напряжений (величины внешней нагрузки) возможна либо стабилизация деформаций, либо развитие обратной деформации, что соответствует установившейся и затухающей ползучести грунта.

При увеличении уровня нагрузки выше реальной эффективной деформируемости в глинистой дисперсной системе начинают преобладать силы отталкивания между частицами, действующие однонаправленно с внешними нагрузками. В этих условиях деформирование происходит как за счет влияния внешней нагрузки, так и внутренних сил взаимодействия между частицами, и при снятии или стабилизации внешней нагрузки деформирование грунта может продолжаться за счет действия последних, что приводит к развитию прогрессирующей ползучести.

При дальнейшем увеличении величины нагрузок при достижении реальным эффективным напряжением уровня реальной эффективной прочности происходит разрушение контактов в грунте. При этом его физического разрушения не происходит, а нарушается только структурное строение.

Важной особенностью структурных контактов дисперсных глинистых грунтов является обратимость, то есть возможность их трансформации из одного типа в другой в определенных условиях. Преобладающий тип контакта определяет строение и свойства глинистых грунтов, поэтому определение условий и закономерностей таких трансформаций является важным для оценки свойств глин и возможностей их изменения. При условии, что нагрузка на грунт не превышает его физической прочности по Мору–Кулону, продолжающееся действие нагрузок приводит к формированию новых структурных связей и характер этих изменений зависит от условий приложения нагрузок. Эти положения по своей сути с позиций взаимодействия структурных контактов минеральных частиц глинистых грунтов соответствуют условиям максимальной нагрузки, при которой возможно определять прочность грунта, теории естественной прочности И.П. Иванова [4], в соответствие с которой собственная реакция глинистого грунта на внешние воздействия происходит в определенном индивидуальном интервале нагрузок, зависящем от его влажностного состояния.

Под действием сжимающих нагрузок происходит сближение частиц грунта, сжатие, утоньшение и постепенное частичное разрушение и переход в свободную воду их гидратных пленок. В результате, в конечном итоге все эти процессы приводят к образованию новых, более прочных контактов и переходу самого грунта в более устойчивое физико-химическое состояние, из текучего в пластичное и, далее, в твердое, что выражается в уплотнении грунта, увеличении плотности, снижении влажности и показателя текучести, усилении прочностных и деформационных свойств (табл. 2).

В условиях приложения нагрузок, направленных на отдаление друг от друга частиц грунта, увеличению расстояния между ними, увеличению толщины гидратных пленок за счет перехода части свободной воды в диффузный слой, трансформация контактов может протекать в обратном направлении, после разрушения под действием нагрузки будут формироваться менее устойчивые контакты. Таким условиям воздействия отвечает действие противодействия, в результате которого происходит разуплотнение грунта, снижение плотности, повышение влажности и показателя текучести, ослабление прочностных и деформационных свойств (табл. 3).

Таблица 2.

Изменение свойств глинистого грунта при действии сжимающей нагрузки

исходный естественный грунт					грунт после воздействия нагрузки				
Влажность, %	Плотность, г/см ³	Показатель текучести, д.е.	Реальные эффективные напряжения в единичном объеме, Н		Влажность, %	Плотность, г/см ³	Показатель текучести, д.е.	Реальные эффективные напряжения в единичном объеме, Н	
			Деформируемость	Прочность				Деформируемость	Прочность,
80.5	1.51	1.01	0.007	0.06	65.0	1.61	0.56	0.12	0.34
65.0	1.61	0.56	0.12	0.34	45.0	1.76	-0.03	0.35	1.24

Таблица 3.

Изменение свойств глинистого грунта при действии противодействия

исходный естественный грунт					грунт после воздействия нагрузки				
Влажность, %	Плотность, г/см ³	Показатель текучести, д.е.	Реальные эффективные напряжения в единичном объеме, Н		Влажность, %	Плотность, г/см ³	Показатель текучести, д.е.	Реальные эффективные напряжения в единичном объеме, Н	
			Деформируемость	Прочность				Деформируемость	Прочность,
12.0	2.27	-0.08	0.24	0.90	18.2	2.13	0.54	0.05	0.19
18.0	2.13	0.54	0.05	0.19	23.0	2.04	1.05	0.003	0.05

Приведенные данные показывают, что дисперсные глинистые системы являются чуткими системами, в которых внешнее воздействие вызывает закономерную ответную реакцию, выражающуюся в изменении их строения и свойств, обусловленном нарушением баланса энергии взаимодействия частиц. Характер таких изменений определяется внешними, видом напряженного состояния, интенсивности и вида нагрузок, и внутренними факторами – преобладающего типа контактов минеральных частиц, их количества и минерального состава, толщины гидратных пленок частиц и другими. Определение и прогноз изменения строения и, как следствие, свойств глинистых грунтов в различном напряженном состоянии возможно при определении их общей и реальной эффективной прочности и деформируемости и уровня общих и реальных напряжений на структурных контактах.

Такой подход к определению свойств глинистых грунтов, основанный на положениях физико-химической теории реальных эффективных напряжений, определяет направление и основные принципы их исследования. Рассмотренные принципы исследований позволяют не только охарактеризовать строение и свойства глинистых грунтов, но дать достоверный прогноз их изменения в результате различных воздействий, основанный на оценке реакции грунта на такие воздействия. Ис-

пользование показателей реальной эффективной прочности и деформируемости в прогнозных расчетах приведет к повышению точности расчетов устойчивости и деформирования глинистых грунтов в реальных условиях нагружения при осуществлении хозяйственной деятельности.

Литература

1. Богданов Е.Н. О механических свойствах глинистых грунтов // *Грунтоведение*. 2012. № 1. С. 64–71.
2. Богданов Е.Н. Состояние проблемы с определением физико-механических свойств грунтов // *Грунтоведение*. 2015. № 1. С. 54-67.
3. Вознесенский Е.А. Пороговые деформации в грунтах // *Геотехника*. 2018. Т. X, № 5-6. С. 6-16.
4. Иванов И.П. Определение показателей сопротивления сдвигу грунтов характеризующих их естественную прочность. *Вестник ЛГУ*, 1975, №6. С. 73–79.
5. Карпенко Ф.С. Физико-химическая природа пределов пластичности глинистых грунтов // *Геоэкология*. 2018. № 5. С. 66-72.
6. Карпенко Ф.С. Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // *Геоэкология*. 2019. № 5. С. 48-60.
7. Карпенко Ф.С. Физико-химическая природа деформируемости глинистых грунтов // *Геоэкология*. 2020. № 6. С. 63-73.
8. Маслов Н.Н. *Прикладная механика грунтов*. М.: изд-во и тип. Машистройиздата, 1949 (Ленинград), 1949, 328 с.
9. Маслов Н.Н., Котов М.Ф. *Инженерная геология*. М.: Стройиздат, 1971, 341 с.
10. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. *Микроструктура глинистых пород* / Под ред. Е.М. Сергеева. М.: Недра, 1989, 210 с.
11. Осипов В.И. *Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах*. М.: ИГЭ РАН, 2012. 74 с.
12. Осипов В.И., Соколов В.Н. *Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств*. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
13. Усов А.Н., Чернов М.С., Соколов В.Н., Вознесенский Е.А. Изменение микростроения глинистых грунтов при деформировании в условиях трехосного сжатия с учетом проявления деформационной неустойчивости. *Вестник МГУ. Сер. 4. Геология*. 2017. № 6. С. 87-91.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ГРУНТОВЕДЕНИЕ И ЕГО ЗАДАЧИ

В.А. Королёв

МГУ им. М.В.Ломоносова, кафедра инженерной и экологической геологии;
119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д.1, геологический ф-т.
E-mail: va-korolev@bk.ru

«В каждой естественной науке заключено
столько истины, сколько в ней есть математики».

И.Кант

Грунтоведение, возникнув из недр почвоведения в связи с запросами строительства, сначала, в 1920-1930-е годы, развивалось в основном как «дорожное грунтоведение» [2,6]. Затем в 1940-1960-е годы грунты стали изучаться в связи с расширяющимися запросами строительства различных инженерных сооружений. При этом основной его целью являлось определение различных показателей грунтов, необходимых для практических расчетов и проектирования инженерных сооружений. Однако на протяжении первых трех четвертей XX века грунтоведение во многом оставалось описательной наукой, в которой преобладали эмпирические методы исследований. И это естественно – начальный этап развития любой геологической науки всегда был описательным, эмпирическим. Но со временем, с накоплением фактов, новых данных и расширением собранной информации, наука переходит в стадию теоретических обобщений: устанавливаются закономерности, вырабатываются законы, объединяемые в теории, происходит её математизация. Это произошло и в грунтоведении – начиная с последней четверти XX века стали выявляться наиболее общие закономерности формирования состава, строения и свойств различных грунтов, были сформулированы законы грунтоведения, началась его цифровизация [4,6].

Последнее обстоятельство является наиболее важным: перевод на язык математики не только накопленной грунтоведческой информации, но и установленных закономерностей и законов грунтоведения, разработка математических моделей, описывающих грунты, их инженерно-геологические особенности и процессы в них, позволяющие прогнозировать свойства и поведение грунтов в различных условиях – актуальнейшая задача современного грунтоведения.

Решение этой задачи, на наш взгляд, возможно в рамках самостоятельного нового раздела грунтоведения – **теоретического грунтоведения**.

Теоретическое грунтоведение - раздел грунтоведения о наиболее общих законах, математически описывающих состав, строение, свойства грунтов и их формирование, процессы в них, а также изменения грунтов под влиянием внутренних и внешних факторов. При этом теоретическое грунтоведение соотносится с общим грунтоведением примерно так же, как *механика* соотносится с *теоретической механикой* и *прикладной механикой*, или *физика* с *теоретической физикой* и т.п. В грунтоведении так же, как, например, в механике, можно выделить теоретический раздел (теоретическое грунтоведение) и раздел прикладного характера, включающий дорожное и аэродромное грунтоведение, строительное грунтоведение, морское грунтоведение и т.п. Теоретический раздел грунтоведения и является рассматриваемым новым разделом – теоретическим грунтоведением.

Объект теоретического грунтоведения: грунты и грунтовые толщи.

Предмет исследования теоретического грунтоведения – наиболее общие математические модели состава, строения и свойств грунтов, процессов в них, математические модели формирования свойств грунтов.

Напомним, что согласно К.Э.Плохотникову [9] под (математическим) моделированием понимается специфическая человеческая деятельность, развертывающаяся поэтапно (онтологизм, гносеологизм, методологизм) в конкретной познавательной ситуации и приводящая к созданию сверхмодели, которая является системной сборкой отдельных элементарных актов моделирования.

В этом отношении теоретическое грунтоведение опирается на всю накопленную базу современного грунтоведения, как основного научного направления инженерной геологии, включая и такие его смежные направления, как динамическое грунтоведение и региональное грунтоведение, и развертывается поэтапно.

Основная цель теоретического грунтоведения – изучение и математическое описание наиболее общих законов формирования состава, строения и свойств грунтов, законов их изменения под влиянием внутренних факторов и внешних воздействий, а также взаимодействия между грунтами, представляемых в математической форме.

Задачи теоретического грунтоведения вытекают из сформулированной выше цели. В наиболее общем виде их можно представить в следующем виде:

Разработка методологической основы теоретического грунтоведения, опирающейся на его онтологию и существующую номологическую базу общего грунтоведения [6]. Это вспомогательная задача, решение которой, тем не менее, является необходимой основой развития всего направления.

Цифровизация грунтоведческой информации и математическое описание (представление) состава, строения и свойств грунтов разных классов, как фактологической основы теоретического грунтоведения. Данную задачу также можно рассматривать как вспомогательную, но ее решение является обязательным и необходимым условием для всего теоретического грунтоведения.

Создание математических моделей, описывающих протекание в грунтах наиболее общих химических, физико-химических, физических, биотических и физико-механических процессов на основе фундаментальных закономерностей и теоретических представлений общего грунтоведения. Это наиболее ёмкая по содержанию и объёму задача, которая разбивается на целый ряд конкретных задач, связанных с принадлежностью грунтов к разным классам, а также с многообразием процессов в них и проявлением различных свойств.

Перевод вербальных законов и теорий общего грунтоведения в математическую форму. Сформулированные к настоящему времени собственные законы грунтоведения, а также большинство теорий, описывающих различные процессы в грунтах, представлены в вербальной (словесной) форме, что затрудняет их применение [5,6]. Представление их в математической форме позволит более эффективное их использование.

Разработка математической модели грунта как иерархической системы от микро- до макроуровня. Это важнейшая задача теоретического грунтоведения, решение которой позволит учитывать проявление масштабного эффекта в грунтах для разных свойств, а также будет способствовать повышению точности инженерно-геологических прогнозов и качества проектирования инженерных сооружений.

Методологической основой достижения вышеуказанной цели и задач теоретического грунтоведения являются выработка и обоснование соответствующих математических моделей, а само математическое моделирование, в том числе вычислительные эксперименты, при этом становится основным теоретическим методом обобщения грунтоведческой информации и её представления. Одновременно теоретическое грунтоведение опирается и на все прочие методы исследования теоретического уровня: логический и системный анализ, дедукцию и индукцию, аналогию, формализацию, типизацию и классифицирование, теоретико-гипотетический метод и др. [5,8].

Современное состояние теоретического грунтоведения можно охарактеризовать как начальную стадию его развития. Отдельные его разделы формируются неравномерно, однако некоторые основные тенденции уже можно сформулировать. Они являются следующими:

Происходит активное развитие цифровизации грунтоведческой информации, создаются базы грунтоведческих данных, как элементы баз больших данных (big data). Процесс цифровизации грунтоведения будет нарастать в ближайшие годы [4].

Отмечается увеличение числа прикладных компьютерных программ, моделирующих различные свойства грунтов.

Среди них наиболее широко разрабатываются и внедряются прикладные программы, моделирующие физико-механические свойства грунтов. Начиная с 1960-х гг. прошлого столетия в механику грунтов стали внедряться расчетные (численные) методы. Появились прикладные программы, применяемые для расчета деформаций, осадок сооружений и т.п. Среди них на первое место вышли программы, основанные на методе конечных элементов (МКЭ) [11-14]. Так, например, программа *Plaxis* (Нидерланды) – получила наиболее широкое распространение в последнее время. Она дает решения геотехнических задач методом конечных элементов. В программе реализованы современные модели грунта, которые отображают нелинейное, зависимое от напряжения и от времени, поведение различных грунтов.

Наряду с моделированием физико-механических свойств грунтов широкое распространение получают программы моделирования тепловых полей в мёрзлых и промерзающих грунтах. Например, программа **Frost 3D** позволяет получать научно-обоснованные прогнозы тепловых режимов многолетнемерзлых грунтов в условиях теплового влияния трубопроводов, добывающих скважин, гидротехнических и других сооружений с учетом термостабилизации грунта и т.п. Программный комплекс **Борей 3D** предназначен для расчета динамики изменений температурного поля многолетнемерзлых грунтов оснований зданий и сооружений с учетом теплового влияния сезоннодействующих охлаждающих устройств (термостабилизаторов), а также инженерных зданий и сооружений. Он реализует математический аппарат численного моделирования распространения температурных полей в грунтовом массиве с учетом фазового перехода незамерзшей воды в спектре отрицательных температур.

Важной особенностью современного этапа развития теоретического грунтоведения является рассмотрение и моделирование грунтов не только на основе *теории сплошной среды* (как это реализуется в большинстве прикладных программ на базе МКЭ), но и на основе *теории дискретной среды*, что особенно актуально для моделирования дисперсных грунтов и процессов в них. Так, например, А.Б.Фадеев [12] обобщил работы в области решения нелинейных задач механики сыпучих тел, в том числе дисперсных грунтов методом конечных элементов. В.В.Ревенко [11] рассмотрел применение МГЭ к дискретно-континуальной модели грунта. В этой модели для областей сдвигов используется дискретная среда, получаемая с помощью разрезов скольжения континуальной среды. Для областей вне сдвигов используется континуальная среда.

Другим важным примером реализации модели дискретной среды является численное моделирование деформирования и прочности дисперсных грунтов с помощью программы **PFC** (Particle Flow Code) [7,15]. Возможности этой программы позволяют учесть влияние гранулометрического состава дисперсных грунтов на распределение контактных напряжений в местах соприкосновения частиц, получить картину затухания напряжений в объеме грунта при деформировании (например, уплотнении, Рис. 1.) и плоскостном сдвиге, а также моделировать сам плоскостной сдвиг (Рис. 2).

На Рис. 1 приведены результаты математического моделирования перераспределения контактных напряжений от вертикальной равномерно распределенной нагрузки 400 кПа в грунтовых бидисперсных смесях разного гранулометрического состава. Здесь шарообразные частицы крупных и мелких фракций показаны кружками разного цвета, а зелеными лентами разной толщины показаны напряжения, возникающие на контакте двух соседних частиц. При этом ширина ленты отражает величину контактного напряжения: чем оно больше, тем шире лента.

Из рисунков 1а,б,в видно, что основная доля наибольших контактных напряжений возникает на контактах более крупных частиц, а на контактах крупных частиц с мелкими происходит постепенное рассеивание напряжений.

Наряду с этим можно ясно видеть, что с уменьшением в смесях доли частиц крупных фракций уменьшается доля больших контактных напряжений и одновременно растет доля меньших напряжений, а их общее распределение в объеме грунта становится более равномерным.

Программа позволяет аналогично наглядным образом оценить перераспределение контактных напряжений между частицами в грунтах разного гранулометрического состава и при иных видах деформирования, а также при сдвиге.

Этот пример показывает, что математическое моделирование на основе теории дискретной среды дает возможность наглядно представить невидимое глазу перераспределение контактных напряжений между частицами грунтовых смесей и лучше понять характерные особенности и закономерности этого процесса.

Другой, не менее важный пример, показанный на Рис. 2, иллюстрирует возможности программы PFC для математического моделирования экспериментов по оценке прочности грунтов заданного гранулометрического состава на сдвиг.

Программа позволяет произвести имитацию сдвига с получением диаграмм сдвига в координатах «касательные напряжения (τ) – деформация сдвига» (Рис. 2а) при разных нормальных напряжениях (σ), а по ним построить диаграмму сдвига в координатах закона Кулона «касательные напряжения (τ) – нормальные напряжения (σ)» (Рис. 2б), по которой можно определить угол внутреннего трения грунта (φ).

Обращает на себя внимание «пилообразный» характер зависимостей касательного напряжения от деформации сдвига (Рис. 2а), который обычно не фиксируется в экспериментах даже в автома-

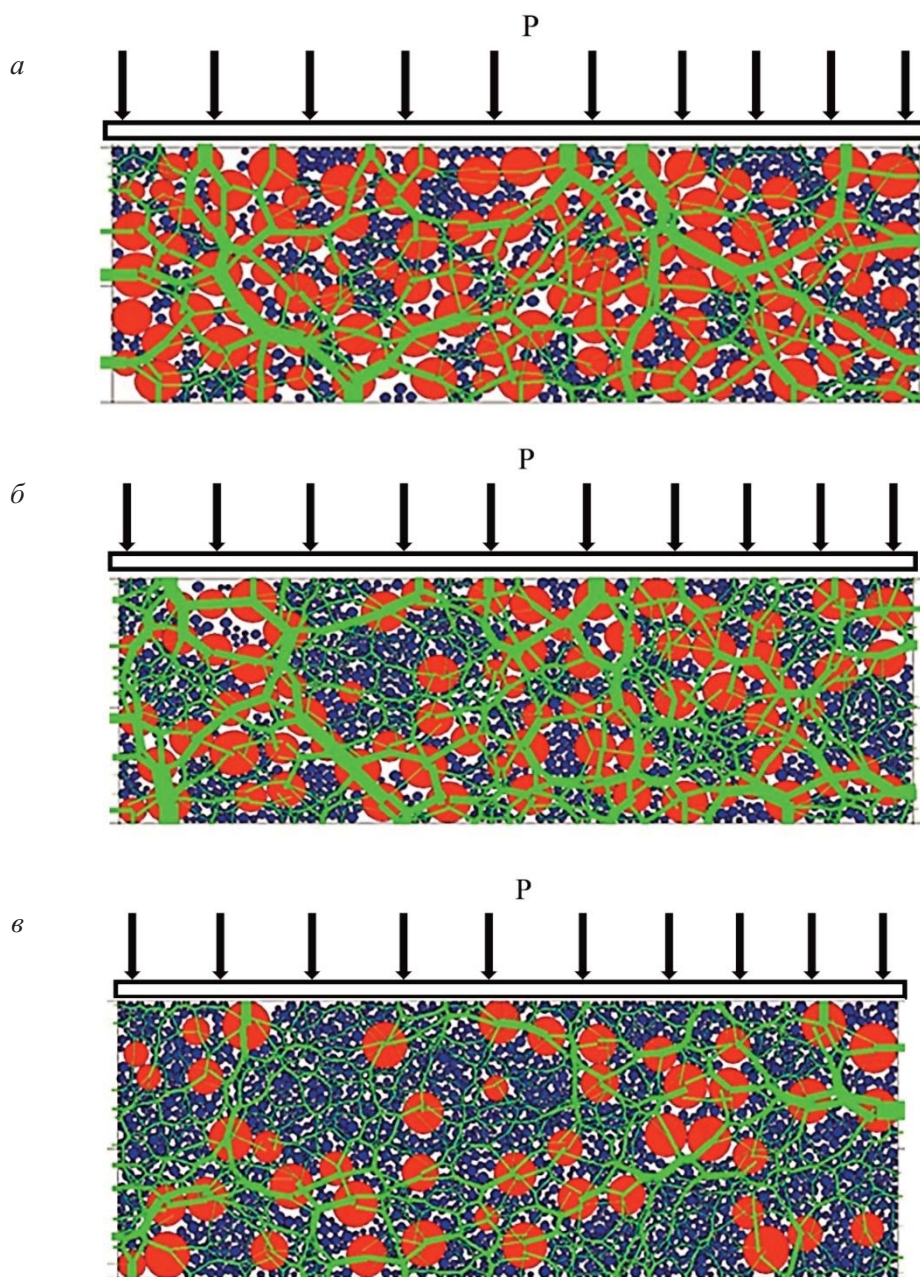


Рис. 1. Распределение контактных напряжений (зеленые ленты) внутри бидисперсных грунтовых смесей, состоящих из фракций 4-2 мм (красные шарики) и 1-0,5 мм (синие шарики) при вертикальной равномерно-распределенной нагрузке $P=400$ кПа. Смесей фракций: *а* – 4-2 мм (80%) + 0,5-1 мм (20%); *б* – 4-2 мм (50%) + 0,5-1 мм (50%); *в* – 4-2 мм (30%) + 0,5-1 мм (70%).

тизированных приборах для испытаний грунтов на сдвиг. Но при математическом моделировании эта особенность сдвига, обусловленная неоднородностью структуры испытываемого грунта и морфологией его структурных элементов, четко проявляется. Более того, из результатов моделирования следует, что чем больше нормальная нагрузка на грунт, тем в большей мере проявляется скачкообразный характер касательных напряжений.

В общем случае программу PFC можно рассматривать как применение метода вычислительных экспериментов, рассматриваемых ниже.

Весьма перспективным направлением теоретического грунтоведения, развивающимся в настоящее время, является исследование различных свойств грунтов на основе численных или *вычислительных экспериментов*, широко применяемых в механике композитных материалов [3]. Суть метода вычислительных экспериментов состоит в том, что исследования ведутся не на материальных объектах (грунтах), а на имитационной модели: вслед за построением математической модели проводится ее численное исследование с помощью вычислительных и логических процедур, позво-

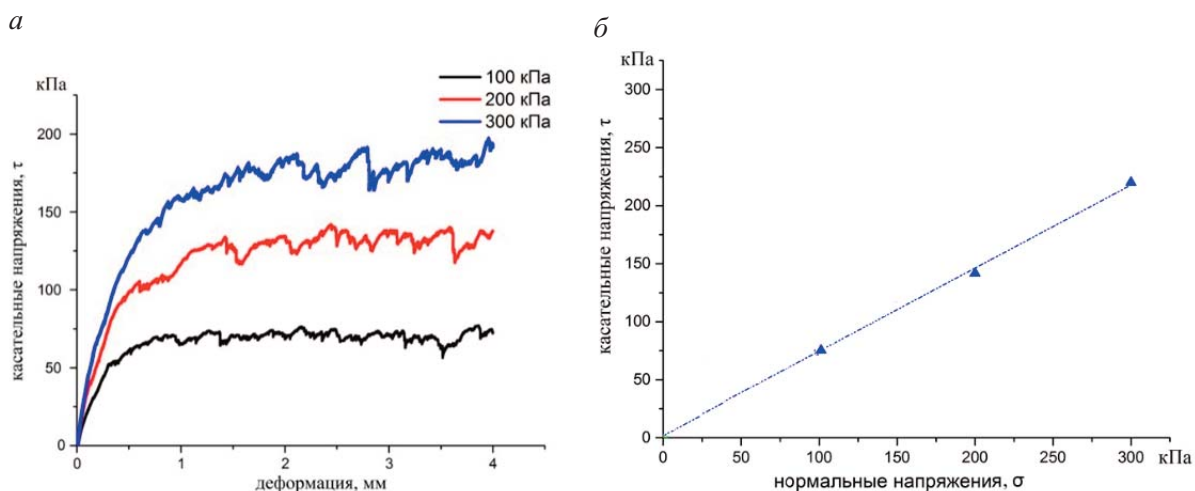


Рис. 2. Диаграмма сдвига монодисперсного песка (фракция размером 0,25-0,5 мм), построенная по результатам моделирования в программе PFC.

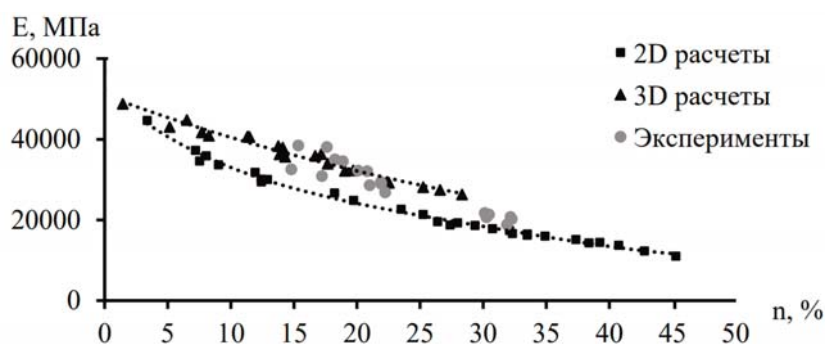


Рис. 3. Зависимость модуля упругости известняка от пористости по результатам экспериментов и численного 2D и 3D моделирования [10].

ляющее «проиграть» поведение исследуемого объекта (в данном случае грунта) в различных условиях или в различных модификациях и получить таким образом новую информацию.

В этой области можно назвать работы по математическому моделированию процесса нелинейной консолидации грунтов с помощью численного моделирования упругопластического деформирования водонасыщенного грунта под нагрузкой при оттоке жидкости [1], а также исследования по изучению физико-механических свойств грунтов по известным параметрам структуры их порового пространства [10].

Такие исследования проводятся в МГУ на основе параметров структуры порового пространства по плоским РЭМ-изображениям (2D-модель), а также по трехмерному изображению структуры, получаемому с помощью рентгеновского томографа (3D-модель). При известном минеральном составе грунта упругие константы его твердого минерального матрикса задаются по справочным данным, а деформационные или прочностные характеристики получают вычислительным методом. В частности, определение вычислительным методом модуля упругости известняка по данным 2D и 3D моделирования показало наилучшую сходимость с экспериментом (при разнице всего в 5-7%) для трехмерного моделирования (Рис. 3).

Подобные исследования свойств грунтов на основе вычислительных методов позволяют выявить наиболее общие закономерности их изменения и прогнозировать их параметры в различных условиях или в зависимости от различных факторов.

Другим важным направлением теоретического грунтоведения является *применение искусственного интеллекта* для решения грунтоведческих задач [4]. В области грунтоведения применение искусственного интеллекта может дать наибольший эффект при разработке инженерно-геологических (грунтоведческих) экспертных (интеллектуальных) систем для решения различных инженерно-геологических задач, классифицирования и систематизации грунтов, оценке инженерно-геологических условий и т.п.

Таким образом, теоретическое грунтоведение является актуальным и перспективным разделом его развития на современном этапе, которое отвечает общей тенденции цифровизации инженерной геологии.

Литература

1. Артамонова Н.Б., Шешенин С.В. Математическое моделирование процесса нелинейной консолидации грунта // Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии / Труды Международной научной конференции (Москва, МГУ, 4 февраля 2021 г.). Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королёва – М.: ООО «Сам Полиграфист», 2021. - С. 228-233.
2. Грунтоведение // Под ред. В.Т. Трофимова – 6-е изд., перераб. и дополн. (серия Классический университетский учебник) / Авт.: В.Т. Трофимов, В.А. Королёв, Е.А. Вознесенский и др. — М.: Изд-во МГУ и Наука, 2005. — 1024 с.
3. Исследование упругих и упругопластических свойств дисперсного композита на основе численных экспериментов / С. В. Шешенин, Н. Б. Артамонова, П. Д. Клементьев и др. - Механика композитных материалов. 2021. Т. 57, № 1. — С. 27–44
4. Королёв В. А. О задачах цифровизации и искусственного интеллекта в инженерной геологии // Инженерная геология. 2021. Т. 16, № 1. — С. 10–23.
5. Королев В.А. Методология научных исследований в инженерной геологии / Уч. пособие. – М.: ООО «СамПолиграфист», 2020. – 353 с.
6. Королев В.А., Трофимов В.Т. Инженерная геология: история, методология и номологические основы. – М.: Изд-во КДУ, 2016. – 292 с.
7. Королёв В.А., Шэнжун Ч. Моделирование физико-механических свойств песчано-гравийных грунтовых смесей с помощью программы PFC. - Инженерная геология. 2018. Т. 13, № 1-2. — С. 6–20.
8. Новик И.Б., Мамедов Н.М., Давтян Н.А. Логика научного познания и метод моделирования / Философско-методологические основания системных исследований. - М.: Наука, 1983. С. 156–179
9. Плохотников К.Э. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент: методология и практика. – М.: Едиториал УРСС, 2003.
10. Применение асимптотического метода осреднения для оценки деформационных свойств грунтов / Орлов Е.А., Артамонова Н.Б., Шешенин С.В., Фролова Ю.В., Кузнецов Р.А. // Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии / Труды Международной научной конференции (Москва, МГУ, 4 февраля 2021 г.). Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королёва – М.: ООО «Сам Полиграфист», 2021. - С. 233-238.
11. Ревенко В.В., Савин А.П. Метод конечных элементов в геомеханике: современный взгляд // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сборник статей межд. научно-техн. конференции; СПбГАСУ. – СПб., 2012. С. 197-203
12. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Изд-во «Недра», 1987. – 224 с.
13. Шашкин А.Г. Методология численных расчетов и проектирования подземных сооружений в условиях городской застройки на слабых грунтах. // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сборник статей межд. научно-техн. конференции; СПбГАСУ. – СПб., 2012. С. 63-70.
14. Шашкин А.Г. Метод конечных элементов в геомеханике: современный взгляд // Там же, с. 76-86.
15. Chong Shi, De-jie Li, Kai-hua Chen, Jia-wen Zhou. Failure mechanism and stability analysis of the Zhenggang Landslide at the Yunnan Province of China using 3D particle flow code simulation. - Journal of Mountain Science, 2016, vol. 13, issue 5, pp. 891-905. DOI:10.1007/s11629-014-3399-0.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ

А.Ю. Мирный

Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 119234, Российская Федерация,
Москва, ГСП-1, Ленинские горы, MirnyuAY@mail.ru

Исследование механических свойств дисперсных грунтов в значительной степени осложнено параллельным протеканием различных процессов. В ходе объемного деформирования происходит уплотнение, что, в свою очередь, приводит к образованию дополнительных контактов, изменению условий сопротивления сдвигу. В то же время при сдвиге наблюдаются явления, обусловленные дискретностью строения – дилатансия и контракция – которые вызывают изменение объема порового пространства. Как следствие, непосредственное определение взаимной зависимости параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) затруднено. Различными исследователями были получены данные зависимости при тех или иных значениях сторонних факторов, например, степени плотности, водонасыщения, режима дренирования и т.д. Комплексный анализ этих данных, фактически, до сих пор не выполнен: большинство закономерностей механики грунтов носит феноменологический характер, и не объясняет физической природы протекающих процессов.

Помимо многофакторности исследуемых процессов, фундаментальное описание закономерностей механического поведения дисперсных грунтов осложнено ограниченными возможностями испытательного оборудования. Ни в одной другой области материаловедения или, в более широком смысле, механики твердого тела, не применяется такого большого количества приборов различных конструкций. Это объясняется практическими трудностями при попытке реализовать в образце однородное НДС, но так как большинство компонентов НДС являются векторными величинами, возникающие отклонения приводят к росту несоответствия между точным аналитическим решением и фактическим экспериментом. В совокупности с изменением структуры образца (а, как следствие, и физико-механических свойств) в ходе опыта это не позволяет однозначно интерпретировать результаты испытаний.

Альтернативным методом интерпретации в данном случае может служить энергетический метод, широко применяемый в механике деформируемого твердого тела и, в особенности, в теории пластичности. Изменение НДС некоторого тела в точке сопровождается преобразованиями энергии. С одной стороны, внешние силы, действующие на данное тело, совершают работу. С другой стороны, затраченная энергия частично запасается силами упругости, а частично расходуется на преодоление внутреннего трения и необратимые структурные изменения. Принимая во внимание, что в условиях лабораторного эксперимента систему можно рассматривать как замкнутую, энергетический подход может уверенно применяться в качестве дополнительного метода интерпретации результатов.

Пионерами в области применения энергетического метода были специалисты в области теории пластичности металлов. Гипотеза о постоянстве внутренней энергии при пластическом течении позволила сформулировать теорию прочности Mises. Большинство теорий пластического течения (в первую очередь, Прандтля – Рейсснера, Сен-Венана – Мизеса, Хилла) учитывают работу пластической деформации или ее мощность. Например, анализ работы деформаций позволяет описать упрочнение при пластическом течении на основании диаграммы Прандтля.

Применительно к механике грунтов этот подход был впервые адаптирован Drucker & Prager [7], предложившими закон неассоциированного течения и специализированное условие текучести. Также известны работы группы исследователей в области теории критического состояния [9], основные положения которой были получены из энергетических предпосылок. Группой исследователей рассматривался метод определения точки перехода к пластическому течению на основании затраченной работы [6]. В настоящее время энергетический подход применяется при исследовании свойств грунтов при динамическом нагружении, что позволяет оценивать степень поглощения энергии путем сопоставления работы упругой деформации и энергии, рассеянной за один цикл нагружения (площади петли гистерезиса) [2]. На основании работы деформации предлагается оценивать так называемую «деформационную неустойчивость» - уровни деформаций, при которых происходят структурные изменения в дисперсных грунтах [1, 3]. Также энергетические методы применяются

для определения истории нагружения (параметров переуплотнения), среди них наибольшее распространение получили методы Becker [4] и Wang & Frost [11].

В настоящей работе предлагается методика интерпретации результатов испытаний осесимметричного трехосного сжатия с позиции энергии и работы деформаций. Этот метод испытаний выбран как, с одной стороны, достаточно широко распространенный, а с другой – позволяющий проводить измерения всех компонентов НДС в ходе опыта.

Испытания трехосного сжатия могут проводиться в различных режимах, определяющих как начальное состояние образца, так и условия дренирования в ходе опыта. Если не рассматривать неконсолидированный режим как узкоспециальный, то в начальный момент опыта фильтрационная консолидация в образце считается завершившейся (избыточное поровое давление отсутствует, плотность скелета постоянна и может быть однозначно определена). В случае полного водонасыщения в недренированном режиме при нагружении объем порового пространства остается постоянным вследствие несжимаемости жидкости. Это означает, что в скелете грунта будут развиваться исключительно деформации сдвига, а приращение среднего напряжения будет вместо объемных деформаций вызывать рост давления в поровой жидкости. Изменение порового давления также будет вызвано дополнительным изменением объема порового пространства при сдвиге – давление будет падать в дилатирующих грунтах и расти в контрактурирующих. Следовательно, в ходе недренированных испытаний энергия будет расходоваться на упругие деформации сдвига, пластические деформации сдвига и изменение порового давления.

В дренированном режиме поровое пространство в ходе опыта открыто, следовательно, поровое давление не изменяется, а увеличение среднего напряжения будет вызывать объемную деформацию. Так обычно происходит при применении стандартной траектории девиаторного раздавливания (СТС), где увеличение максимального главного напряжения вызывает так же приращение среднего напряжения. Процессы дилатансии и контракции протекают свободно. Энергия расходуется на упругие и пластические сдвиговые и объемные деформации, причем пластическая составляющая объемной деформации складывается из действия среднего напряжения и дилатансии/контракции.

Реализация траектории нагружения с постоянным средним напряжением (ТС) приводит к тому, что любая объемная деформация в опыте происходит исключительно вследствие дилатансии/контракции. Энергия расходуется на упругие и пластические сдвиговые деформации, а деформации объема исключительно пластические и вызваны дилатансией/контракцией. Таким образом, при наличии серии опытов в различных режимах, с различными траекториями нагружения и при различных средних напряжениях можно разделить параллельно протекающие процессы и сопоставить между собой затрачиваемую на них работу.

<i>Таблица 1.</i>			
Затраты энергии в ходе испытания трехосного сжатия и их проявления в различных режимах			
Вид деформации	КН	КД (СТС)	КД (ТС)
Упругие деформации объема	+	+	-
Пластические деформации объема – уплотнение	-	+	-
Пластические деформации объема – дилатансия/контракция	-	+	+
Упругие деформации сдвига	+	+	+
Пластические деформации сдвига	+	+	+
Изменение давления в поровой жидкости	+	-	-

В качестве экспериментальной базы в настоящей работе рассматриваются результаты испытаний трехосного сжатия модельных грунтов (дресвы кварца фракции 2-5 мм), выполненные в стабилометре с диаметром образцов 300 мм, изготовленном ООО «НПП «Геотек» для НИУ МГСУ. Испытания выполнялись при среднем напряжении 200, 400 и 800 кПа. Все испытания выполнялись в кинематическом режиме с постоянной скоростью деформации. В результате были получены зависимости вертикальной деформации от девиатора напряжений, и также объемной деформации от вертикальной, с учетом всех необходимых поправок, обусловленных конструкцией прибора. Полученный набор данных позволяет построить любые зависимости для прочих компонентов НДС.

Принцип обработки результатов заключается в следующем. Общую работу, совершенную над образцом, характеризует измеренное вертикальное усилие, умноженное на перемещение штока. Эта работа расходуется на деформирование образца, для каждого вида деформации может быть определено приращение работы на единицу объема образца. Его величину ΔW можно определить для каждой деформации и напряжения по известной формуле:

$$\Delta W = \Delta \sigma \Delta \varepsilon / 2. \quad (1)$$

Графически работа может быть представлена как площадь под графиком зависимости деформаций от напряжений. Но исходя из предпосылок общей механики твердого тела (упругая деформация прямо пропорциональна напряжению, пластическое течение происходит при постоянном напряжении, при пластическом течении приращение объемной деформации равно нулю) на графике могут быть выделены участки, соответствующие различным фазам опыта.

Наиболее просто анализ выполняется для испытаний по траектории ТС. Если выделить последний участок, соответствующий постоянному наклону графика зависимости $W(\gamma)$, то можно считать, что на данном участке развивается исключительно пластическое деформирование. При этом развиваются как деформации сдвига, так и деформации объема за счет дилатансии. Учитывая, что затраты энергии в данном случае вызваны исключительно преодолением трения, то коэффициент уравнений линейной аппроксимации может рассматриваться как функция внутреннего трения, что подтверждается линейной зависимостью этого коэффициента от давления в камере. Данный коэффициент по смыслу соответствует пластическому коэффициенту λ , связывающему между собой приращение работы пластической деформации и интенсивность касательных напряжений в теории пластического течения:

$$d\lambda = \frac{dA_p}{2\tau^2}. \quad (2)$$

Примечательно, что эти линии пересекают ось ординат практически в одной и той же точке, соответствующей деформации сдвига 0,0108-0,0129. Такая деформация сдвига соответствует осевой деформации 0,007, что в абсолютных величинах составляет 4,2 мм – приблизительно средний размер частицы.

Если соотнести полученную скорость изменения работы относительно деформации сдвига и работу, совершенную нагрузочным устройством, то можно выявить расхождение – для образца, испытанного при давлении в камере 800 кПа, работа деформаций сдвига составляет 77,1% от общей работы нагрузочного устройства. Оставшиеся 22,9% энергии затрачены на трение в элементах прибора, деформирование упругой оболочки и – в основном – на работу по пластическому деформированию объема. Это наблюдение дает основание рассматривать зависимость объемной деформации от девиатора напряжений, и аналогичным образом получить величину энергии, затраченной на пластическое деформирование объема.

С другой стороны, построение аппроксимирующих линий из начала координат позволяет получить энергию, расходуемую на упругое деформирование. Их наклон также пропорционален давлению в камере, при этом аппроксимируются эти точки уже степенной функцией. Это хорошо соотносится со степенным законом зависимости жесткости от напряжения, неоднократно описанным для различных условий [5, 8, 10].

Таким образом, анализ результатов испытания с постоянным средним нагружением позволяет достоверно получить следующие закономерности:

- энергию упругого деформирования;
- энергию пластических деформаций сдвига и объема (раздельно).

В испытании по траектории девиаторного раздавливания (СТС) эти процессы будут накладываться друг на друга, при этом перестанут быть линейными, так как в ходе опыта среднее напряжение возрастает (а значит идет повышение жесткости и сопротивления сдвигу). Это означает, что и упругое, и пластическое деформирование с ростом напряжений будут требовать большей энергии. Но, учитывая, что испытания проводятся на одном и том же материале, полученные ранее зависимости будут частично справедливы.

В результате, посредством совместного анализа испытаний по двум различным траекториям, возможно раздельно описать все протекающие процессы деформирования. Такой метод обра-

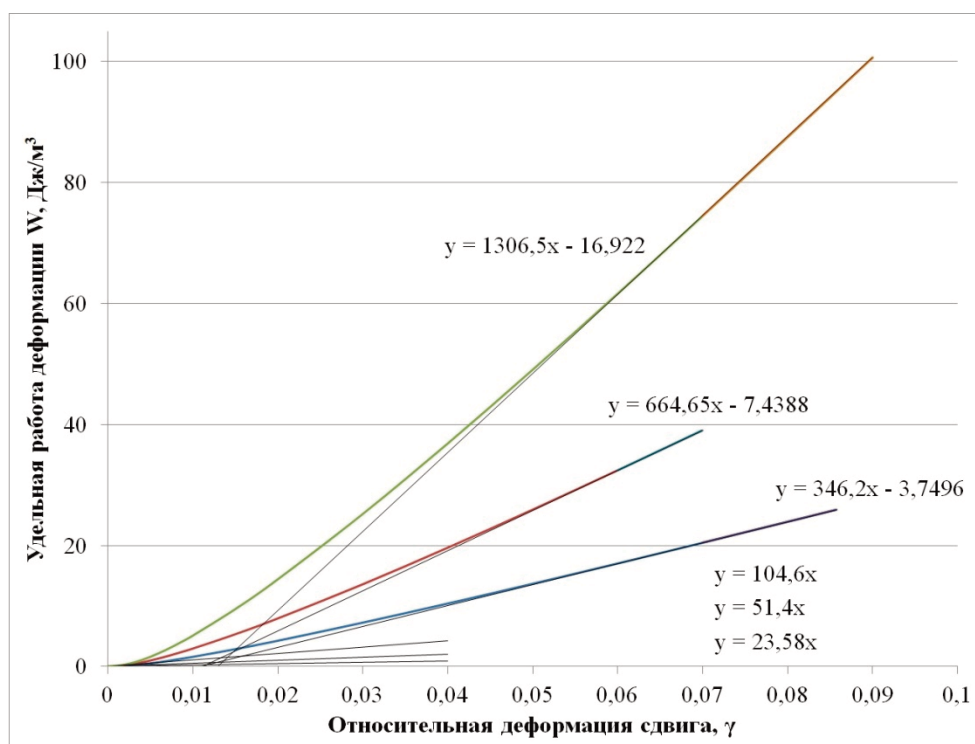


Рис. 1. Зависимости удельной работы деформации от относительной деформации сдвига для испытаний при давлении в камере 200, 400 и 800 кПа с корреляционными уравнениями начальных и конечных линейных участков.

ботки после соответствующей верификации может позволить разработать математические модели поведения, которые будут в качестве параметров использовать не различные механические модули, а энергетические параметры, в свою очередь определяемые внутренним трением и прочностью контактов. Для выражено пластических сред, которыми являются дисперсные грунты, это в большей степени отражает их структурные особенности, чем гипотезы механики сплошной среды.

Предлагаемый метод анализа результатов испытаний трехосного сжатия может применяться и к другим видам лабораторных испытаний, при условии постоянства НДС в ходе опыта.

Литература

1. Вознесенский Е. А. Пороговые деформации в грунтах // *Геотехника*. 2018. № 5–6 (10). с. 6–16.
2. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях / К. Ишихара, НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект»-е изд., СПб., 2006. 383 с.
3. Усов А. Н., Вознесенский Е. А. Деформационная неустойчивость в глинистых грунтах. Возникновение и идентификация // *Инженерная геология*. 2016. № 2. с. 14–21.
4. Becker D. E. [и др.]. Work as a criterion for determining in-situ and yield stresses in clays // *Canadian Geotechnical Journal*. 1987. (24). с. 549–564.
5. Benz T. *Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences* 2007.
6. Crooks J. H. A., Graham J. *Geotechnical properties of the Belfast estuarine deposits* // *Geotechnique*. 1976. № 2 (26). с. 293–315.
7. Drucker D. C., Prager W. *Soil mechanics and plastic analysis or limit design* // *Journal of applied Mathematics*. 1952. № 10. с. 157–165.
8. Janbu N. *Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests* Wiesbaden., 1963. с. 19–25.
9. Roscoe K. H., Schofield A. N., Wroth C. P. *On the yielding of soils* // *Geotechnique*. 1958. № 8. с. 22–53.
10. Schanz T., Vermeer P. A., Bonnier P. G. *The hardening soil model: formulation and verification* Rotterdam: Balkema, 1999. с. 1–16.
11. Wang L. B., Frost J. D. *Dissipated Strain Energy Method for Determining Preconsolidation Pressure* // *Canadian Geotechnical Journal*. 2004. № 4 (41). с. 760–768.

ПОВЕДЕНИЕ ГРУНТОВ И ДИССИПАТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ОПОЛЗНЕВОГО БЛОКА

Г.П. Постоев, А.И. Казеев, М.М. Кучуков

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Москва, Уланский пер., 13, стр. 2. E-mail: opolzen@geoenv.ru

Введение

В развитии оползневой процесс нередко в качестве основного фактора, определяющего возникновение оползня или его активизацию, представляют в виде особенностей состояния и прочности грунтов, их проявления как «слабого» слоя в массиве, изменения их свойств под воздействием природных и техногенных факторов. Эти представления распространяют как на покровные неглубокие оползни типов сдвига-скольжения и разжижения-течения, так и на глубокие блоковые оползни, типа сжатия-выдавливания, с выделением в последних, грунтов так называемого «основного деформирующегося горизонта». Образование нового оползневой блока сопровождается проявлением разрушительных смещений на оползневой участке, захватывающем весь склон. Такие события нередки на урбанизированных территориях, на склонах с развитием глубоких оползней сжатия-выдавливания. В данной статье рассматривается механизм образования оползневой блока и геологические закономерности преобразования напряжённо-деформированного состояния массива, представлены новые данные о поведении грунтов на различных этапах диссипации, в том числе при отделении возникшей диссипативной геологической структуры в виде оползневой блока.

Исходные прочность и состояние грунтов в массиве

Рассматривается оползневой цирк, оползневой тело представлено смещёнными блоками. При естественном развитии оползневой процесс в цирке периодически происходит катастрофическая активизация оползневой деформаций (стадия основного смещения), связанная с образованием в коренном массиве надоползневой уступа нового оползневой блока.

Коренной грунтовой массив находится в условиях компрессионного сжатия. Согласно законам физики, в воздушной и водной среде давление в точке вызывается весом столба газа или жидкости над ней (закон Паскаля с учетом земного тяготения). В геологической среде также в соответствии с законами физики давление в точке определяется весом столба грунта, но с учетом сил сопротивления, вызываемых прочностью структурных связей и трением между частицами грунта.

Напряжённо-деформированное состояние грунта в точке в условиях компрессионного сжатия характеризуется законом прочности Кулона-Мора [3]:

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_{str}} = tg^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 – соответственно наибольшее и наименьшее главные напряжения; σ_{str} – структурная прочность грунта; φ – угол внутреннего трения грунта.

Структурная прочность σ_{str} определяется как предельное давление при испытании образца грунта на одноосное сжатие, характеризует прочность структурных связей грунта, прочность грунта как материала; аналитически $\sigma_{str} = 2c \cdot tg(45 + \varphi/2)$, где c – сцепление грунта.

От вертикального давления $\sigma_i = \gamma Z_i$ в каждой i -той точке массива (элементарном объёме грунта) на глубине Z_i возникает распорное давление p_i , в соответствии с (1):

$$p_i = \sigma_3 = (\sigma_{1,i} - \sigma_{str,i}) \cdot tg^2\left(45 - \frac{\varphi_i}{2}\right), \quad (2)$$

Таким образом, формируется статичное напряжённо-деформированное состояние (НДС) в грунтовой массиве, с действием распорного давления по (2), с учетом исходных геологических условий и совокупности других факторов, проявляющихся в каждой i -той точке массива.

Грунт в каждой точке характеризуется значением структурной прочности, которое включает все факторы естественного сложения, в том числе влияние тектонических нарушений, особенности литологии, влажности и величину угла внутреннего трения в условиях компрессионного сжатия.

Диссипация влияния склона (первый этап диссипации). Формирование склона, развитие процессов выветривания и оползневых смещений разуплотнённых покровных масс, изменение угла наклона поверхности склона, вызывают изменение напряжений в каждой i -той точке массива, как на участке склона, так и в грунтах, залегающих за бровкой склона (в коренном массиве). Формирование склона и склоновые процессы инициируют разгрузку напряжений в коренном массиве, что проявляется в снижении давления распора в точках в зависимости от степени их близости к бровке склона (зоне разгрузки напряжений). При этом происходит плавное оседание поверхности коренного массива с формированием наклона к бровке склона. В выражении распорного давления появляется новый множитель, который учитывает степень удаления точки в массиве от бровки склона [4]:

$$p_i = (\gamma Z_i - \sigma_{str}) (1 - 1/R_i) \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2), \quad (3)$$

где $R_i = \Delta_i + R_0$; R_0 – радиус кривизны бровки склона; Δ_i – расстояние от точки по горизонтальной поверхности на глубине Z_i до бровки склона (проекция бровки на горизонт), по нормали к бровке.

Сравнивая выражения (2) и (3), можно отметить, что вертикальное давление сохраняется в точке в исходном значении. Влияние разгрузки напряжений (снижение отпора со стороны склона) и появление деформаций в точке вызывает в основном, в соответствии с (3) и выражением $\sigma_{stri} = 2c_i \operatorname{tg}(45 + \varphi_i/2)$, снижение величины сцепления (вследствие деформаций структурных связей) и соответственно структурной прочности. Значение угла внутреннего трения практически мало изменяется [4].

Указанные изменения исходных значений состояния и прочности грунта в точках коренного массива происходят в связи с возникновением силовых линий в поле напряжений. НДС изменяется посредством взаимодействия рассматриваемых точек между собой по схеме равенства распора отпору (отпор регламентирует изменение давления в точке), без образования на этом этапе диссипации каких-либо новых границ и структур.

Диссипативные геологические структуры (второй этап диссипации)

Профессором И.Р. Пригожиным (нобелевский лауреат 1977 г., Бельгия) установлено, что в физических и химических процессах при определенных условиях возникают диссипативные структуры [6]. В работе [3] было показано, что в геологической среде, как и в других средах (воздушной и водной) на участках локального силового возмущения (изменения исходного напряжённо-деформированного состояния (НДС) возникает **физический процесс диссипации** внешнего воздействия с образованием новых структур. Геологический процесс образования в оползнеопасном коренном массиве диссипативных геологических структур (ДГС) начинается, когда проявилась нижняя граница диссипации (базис диссипации – базис оползания на склоне) и создалась угроза распространения разрушительных оползневых деформаций в грунтах коренного массива. ДГС образуются как защитные структуры, взаимодействующие с оползневой участком и предотвращающие распространение оползневого процесса далее на коренные грунты.

Оползневой цикл на участке естественного развития блокового оползня сжатия-выдавливания завершается образованием относительно ровной оползневой террасы. Высота надоползневого уступа (откоса коренного массива) при этом достигает предельного значения (Рис. 1).

На этом этапе в коренном массиве образуются новые диссипативные геологические структуры в виде полуцилиндров [3]. Новые геологические образования выступают как отдельные замкнутые грунтовые массивы с геологическими границами, со своим НДС. На участке оползневого цирка нижней границей диссипации влияния оползневого процесса и базисом возникших крупных структур в коренном массиве (в сечении по центральному створу) является базис смещения оползневого массива в цирке. Функционирование ДГС определяет закономерности подготовки предельного состояния в оползнеопасном коренном массиве и проявления разрушительных деформаций при отделении и смещении ДГС в виде нового оползневого блока. К настоящему времени известно, что ДГС образуются не только при подготовке оползневых блоков, но и при об-

разовании провалов над подземными полостями, грунтовых основаниях под нагрузкой от фундаментов сооружений, при геодинамическом анализе геологических условий месторождений полезных ископаемых [2, 3, 5].

Грунты внутри ДГС в коренном массиве оползневого участка сохраняют исходную прочность и давление распора в точках, в соответствии с уравнениями (1) и (2). При этом грунты создают общность, объединение в отдельную замкнутую структуру – ДГС. НДС грунтов внутри ДГС практически остается неизменным, как в исходном положении массива. Основные изменения концентрируются в грунтах по граничной оболочке ДГС.

Грунты в оболочке находятся под действием напряжений, значительно превышающих распорное давление в точке [3]:

$\sigma_{mi} = Z_a p_i / h$, где σ_{mi} – кольцевое напряжение в оболочке на глубине Z_i , по касательной к круговой границе ДГС; Z_a – глубина от бровки склона (бровки откоса коренного массива) до нижней границы (базиса) ДГС, радиус круговой границы ДГС, в вертикальном её сечении; h – толщина оболочки.

Т.е. напряжения в грунтах у границы ДГС в Z_a выше, чем давление в точке на глубине Z_i в грунтах ДГС (величина Z_a может составлять десятки и сотни метров). Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям σ_{mi} превышает p_i более, чем на два порядка.

В оболочке формируется узкая зона по цилиндрической поверхности ДГС, где грунты, под действием кольцевых напряжений σ_{mi} и вращательного движения ДГС, находятся **в условиях скашивания** с одинаковой угловой деформацией во всех точках оболочки. Общие условия деформирования регламентируются изменением НДС в нижней точке ДГС, на горизонте её базиса. При этом угловые деформации скашивания вызывают растяжение грунта в узкой зоне оболочки в условиях компрессионного сжатия геологической среды, включая зону оболочки

НДС грунтов в оболочке. На горизонте базиса (нижней границе диссипации), где, как указано выше, распорное давление в ДГС имеет наибольшее значение, происходит снижение отпора (разгрузка напряжений) со стороны оползневого склона и возникают пластические деформации грунта в нижней части ДГС и соответственно снижение напряжения в оболочке. Массив ДГС осуществляет вращательное движение единым жёстким телом по оболочке как узкой зоне сдвига, при сохранении её исходной толщины и связей грунтов оболочки и ДГС, т.е. подобно неразрывному угловому скашиванию грунтов в контактной зоне. Происходит осадка грунтов в верхней части оболочки и деформации поворота (вращение в сторону источника силового возмущения - оползневого массива) грунтов, прилегающих к базису. Возможны также деформации скашивания и по внутренним граничным оболочкам, образующим связи между ДГС (Рис. 1, линия $C_2 O_1$).

Перемещение ДГС относительно оболочки, подобное скашиванию (схема простого сдвига), происходит в слое толщиной $h = 0,009 Z_a = \text{const}$. Массив ДГС осуществляет вращательное движение в сторону источника возмущения. Процесс деформирования по схеме простого сдвига по всей оболочке ДГС регламентируется изменением НДС в точке C_1 (Рис. 1, ДГС4 с центром O_1). В целях защиты геологической среды от распространения оползневого процесса в ходе развития диссипативного геологического процесса предусмотрена возможность отделения ДГС в виде оползневого блока. Момент отделения наступает, когда в грунтах оболочки на горизонте базиса (точка C_1) перемещение (длина дуги) в процессе скашивания достигает критического значения $\Delta l = h$. Т.е. в оболочке толщиной h при образовании ДГС возникает механизм простого сдвига, с ростом угла скашивания между внешней и внутренней поверхностями оболочки. Предельное значение угла скашивания 45° , при котором величина перемещения становится равной толщине h оболочки. В нижней точке ДГС, на горизонте базиса, происходит сдвиг практически в горизонтальном направлении (по касательной к оболочке), а на уровне верхней площадки – вниз по вертикали, как осадка. При этом критическое значение центрального угла на дугу перемещения составит ноль градусов и (π^3) минут, или $\alpha_{cr} = h/Z_a = 0,00901944$ радиана. Данное значение является постоянным независимо от размеров ДГС, т.е. $\alpha_{cr} = 0,00901944 = \text{const}$, (как угол поворота жёсткого цилиндра). Соответственно толщина оболочки, в которой происходят основные изменения НДС, зависит от размеров ДГС, в частности его основного параметра – радиуса кривизны Z_a и угла α_{cr} , т.е. $h = \alpha_{cr} Z_a$, где α_{cr} в радианах. При этом и значение относительной осадки ДГС, поскольку параметры процесса скашивания в оболочке едины на всех горизонтах ДГС, составляет $\varepsilon_{cr} = h/Z_a = 0,009$ (на участке выхода оболочки на поверхность). Т.е. и по осадке предельное со-

стояние ДГС наступает при критическом её значении Δl_{cr} , когда величина перемещения грунтов массива ДГС относительно оболочки в точке С достигнет:

$$\Delta l_{cr} = h = 0,009Z_a. \quad (4)$$

Т.е. значение угла скашивания в предельном состоянии, как указано выше, составляет 45° . Следует отметить, что в процессе скашивания грунт испытывает растяжение в условиях компрессии. Если выделить в вертикальном сечении оболочки квадрат со сторонами h , то длина диагонали составит $a_0 = h\sqrt{2}$ (удлинение по сравнению с h составит 1,414). В предельном состоянии, когда $\Delta l_{cr} = h$ диагональ исходного квадрата достигнет значения $a_{cr} = h\sqrt{5}$ (или 1,581 от исходной величины). Т.е. удлинение диагонали и соответственно деформация грунта при растяжении составит более 50% или в среднем $\pi/2$ раз. Это означает, что в процессе скашивания грунта в узкой зоне оболочки проявляются пластические деформации (практически запредельные для условий свободного растяжения). В скальных и связных глинистых грунтах эти явления отражаются в образовании изгиба слоёв, складок в указанной зоне ДГС. Критическое состояние по прочности грунта в оболочке и переход от режима скашивания в деформирование сдвига регламентируется изменением НДС на уровне базиса (в точке C_1 по центральному створу) и достигается одновременно по всей оболочке.

Оценка предельного состояния. Уравнение предельного состояния коренного массива надоползневой уступа выводится из рассмотрения взаимодействия ДГС в коренных грунтах и в оползневом массиве (граничном блоке – прилегающем к коренному массиву смещённом ДГС, см. Рис. 1):

$$\gamma Z_a - \sigma_{str,a} = \pi \cdot \gamma \cdot \frac{Z_a - H_{cr}}{2}, \quad (5)$$

где Z_a – глубина до базиса оползания блока; γ – среднее значение удельного веса грунта до глубины Z_a ; $\sigma_{str,a}$ – исходное значение структурной прочности грунта в ДГС на глубине Z_a ; H_{cr} – критическое значение высоты откоса ДГС.

В соответствии с Рис. 1 анализируется НДС ДГС4 (в коренном массиве) и ДГС3 (в оползневом массиве) в сечении по центральному створу, в частности напряжений в оболочке на горизонте

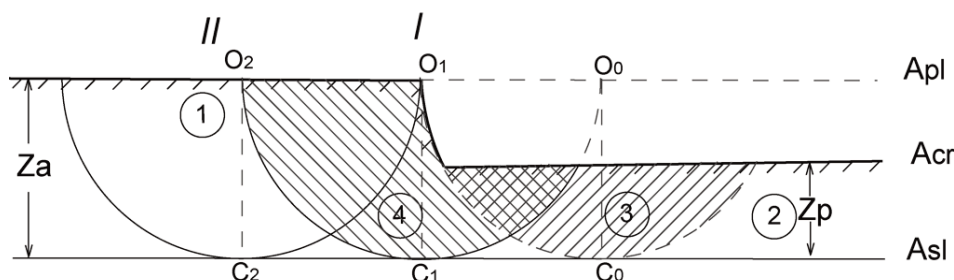


Рис. 1. Схема расположения диссипативных геологических структур по центральному сечению оползневой очага при формировании нового оползневой блока. 1 и 2 – соответственно коренной и оползневой массивы; 3 – смещённый оползневой блок с дневной поверхностью на уровне оползневой террасы, в завершении оползневой цикла; 4 – ДГС (блок) в предельном состоянии надоползневой уступа коренного массива по контакту с оползневой террасой; C_0, C_1, C_2 – точки ДГС на горизонте базиса. A_{pl}, A_{cr} и A_{sl} – соответственно уровни плато, оползневой террасы и основной поверхности скольжения (базиса) оползневой массива, ($Z_a - Z_p = H_{cr}$).

базиса (точка C_1), с учетом прочности грунтов в данной точке. Следует иметь в виду, что в ДГС, как и в точке массива, действует распорное давление (2). ДГС выступает как крупная точка, в которой отпор (со стороны оползневой склона) создаётся напряжениями в оболочке, с максимальными их значениями по нижней границе ДГС (базису A_{sl}), определяющими, с учётом прочности грунтов в этой зоне и взаимодействия с геологическим процессом (оползневый), воздействующим на НДС грунтов на уровне базиса, условия равновесия ДГС по (5).

О возникновении ДГС. Переход от первого этапа диссипации ко второму (с образованием ДГС) недостаточно изучен. Как показали исследования В.В. Жихович [1], при напряжениях, не

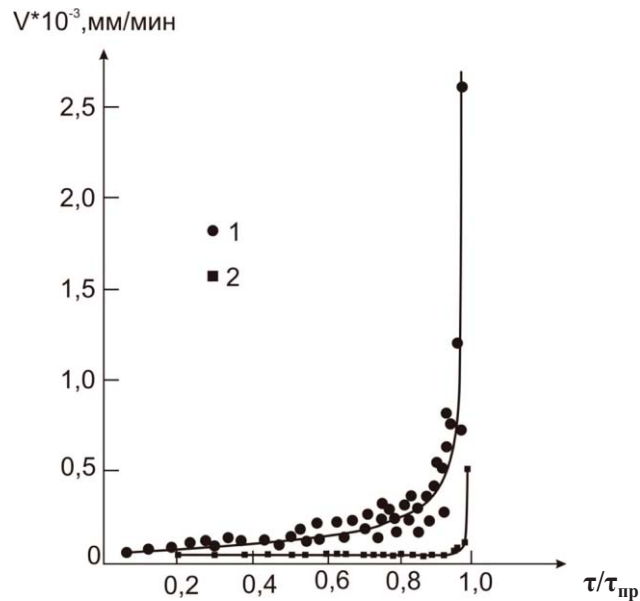


Рис. 2. Графики зависимости скорости ползучести от уровня напряжений при различном темпе нагружения глинистого грунта, по В.В. Жихович [1]. 1 – испытание по схеме час-ступень; 2 – по схеме сутки-ступень.

превышающих 80% от предельных, при длительном периоде изменения напряжений в массиве, что имеет место в развитии глубоких оползней, существенных изменений в напряженно-деформированном состоянии в грунтовом слое массива происходить не может (Рис. 2).

По всей вероятности, до момента наступления предельного состояния по (5), ДГС и границы между ними в коренном массиве не проявляются. На заключительном этапе завершения оползневой цикла, когда возникает реальная угроза вовлечения в оползневой процесс и грунтов коренного массива, в нем возникают ДГС. В соответствии с результатами исследований В.В. Жихович, этот момент может быть достигнут, когда состояние коренного массива может составлять 0,8-0,9 от предельного по (5), на горизонте базиса по центральному створу. Далее начинается вращательное движение ДГС надоползневого уступа, образуется трещина закола в верхней части оболочки ДГС и начинаются процессы скашивания грунтов в оболочке.

Отделение ДГС-блока. Нарушение равновесия по (4) и (5) приводит к резкому изменению НДС грунтов по контакту ДГС с оболочкой и отделению массива ДГС от оболочки на всём её протяжении, с вращательным движением массива. Т.е. разрушение грунтового массива с отделением блока происходит по схеме компрессионного сжатия (исходные условия), где изменение НДС и подготовка предельного состояния развиваются по закону Кулона-Мора в главных напряжениях. Причём смещение массива ДГС относительно оболочки, как указано выше, вначале происходит по механизму скашивания, а после достижения критерия (4), в условиях предельного состояния по (5), и отделения ДГС по оболочке, развивается далее по образовавшемуся контакту с грунтами в оболочке как движение по подготовленной поверхности. У связных глинистых и скальных грунтов процесс отделения и смещения оползневого блока приобретает катастрофический характер, поскольку происходит разрыв структурных связей в грунтах оболочки и соответственно сцепление и структурная прочность грунтов по контакту становятся равными нулю.

Геологической средой предусмотрено (предопределено) отделение ДГС в виде нового оползневого блока в ходе развития диссипативного геологического процесса как завершающего этапа изменения исходного НДС в целях защиты геологической среды (коренного массива) на данном участке от оползневого процесса и возвращения НДС в массиве к исходным условиям. Механизм отделения в соответствии с теоретическими исследованиями и анализом данных натуральных наблюдений включает развитие деформаций в грунтах оболочки по схеме простого сдвига со скашиванием его нормальных к поверхности сечений до угла 45° (в предельном состоянии). При этом величина сдвига грунтов оболочки оказывается равной её толщине, а критическое значение центрального угла в ДГС на дугу сдвига составляет 0,009 радиан. Соответственно и отношение $h/Z_a = \alpha_{cr} = 0,009 = \text{const}$.

Катастрофичность развития оползневого смещения нового блока во многом определяется возникновением моментов сил, действующих в оболочке ДГС-блока. Если в предельном состоянии

уравнение (5) определяет равновесие напряжений в нижней части ДГС на горизонте базиса, то после отделения ДГС момент сдвигающих сил превышает момент удерживающих сил в $\pi/2$ раз (отделившийся блок становится оползневым и в правой части уравнения (5) также появляется коэффициент $\pi/2$), что приводит к катастрофическому изменению соотношения сил и возникновению разрушительных оползневых деформаций.

Литература

1. Жихович В.В. О наличии оползней выдавливания на склонах одесского побережья // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2007. № 5. С. 7-11.
2. Казанкова Э.Р., Корнилова Н.В. Структурирование геологической среды на различных уровнях организации // *Актуальные проблемы нефти и газа*. Вып. 1(20). 2018. С.1-15.
3. Постоев Г.П., Кучуков М.М., Казеев А.И. Физические законы распределения давления в геологической среде // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2020. № 6. С. 22-31.
4. Постоев Г.П. *Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований)*. М.; СПб.: Нестор-история, 2013. 100 с.
5. Постоев Г.П. Модели механизма формирования и расчёта провалов земной поверхности над подземными полостями // *Геоэкология*, 2020. №4. С. 36-47.
6. Prigogine I., Nicolis G. *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*. New York: J. Wiley & Sons, 1977.

НОВЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНОСТИ В УЧЕБНИКАХ ПО ГРУНТОВЕДЕНИЮ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

В.Т. Трофимов, В.А. Королёв

МГУ им. М.В.Ломоносова, кафедра инженерной и экологической геологии;
119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д.1, геологический ф-т; e-mail: trofimov@rector.msu.ru

За последние два десятилетия в России было издано более полусотни учебных изданий по грунтоведению и инженерной геологии, предназначенных для высшей школы и среднего профессионального образования (СПО). Наибольшее из них число посвящено собственно инженерной геологии или точнее – вопросам (элементам) общей инженерной геологии (около 51%), грунтоведению (23%), инженерной геодинамике (11%), региональной инженерной геологии (2%) и прочим специальным или методическим вопросам инженерной геологии (13%). Как видим, хуже всего обстоит дело с учебной литературой по таким научным направлениям инженерной геологии как инженерная геодинамика, по которой вышли единицы учебников [5,16,20-22,45], и особенно – региональная инженерная геология, – по ней было опубликовано всего одно пособие [52]. К сожалению, единична и учебная литература по инженерно-геологическим картам и картированию [46].

Казалось бы, что по общим вопросам инженерной геологии всё обстоит хорошо – за последние два десятилетия была издана и переиздана масса учебников и учебных пособий под названием «Инженерная геология». Например, учебники В.П.Ананьева с соавторами [1,3], предназначенные для студентов строительных специальностей вузов, в разных вариантах переиздавались трижды, учебник Э.М.Доброва [11] для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобильные дороги и аэродромы» и направлению «Строительство», также переиздавался трижды. Примеры можно продолжить. Однако, если рассмотреть содержание многих учебных изданий с этим названием, то получается не совсем благоприятная картина – в этих изданиях содержится масса недочетов, в том числе фундаментального характера.

К сожалению, не во всех учебниках по грунтоведению и инженерной геологии, изданных в России в последние два десятилетия, можно найти фундаментальные положения, отражающие современный уровень их развития. Более того, в подавляющем большинстве учебников нет формулировок законов инженерной геологии, базовых методологических положений, проблематики, фундаментальных и прикладных задач, стоящих перед этой наукой.

Фундаментальные положения (или фундаментальности), излагаемые в учебниках, в концентрированном виде представляют студентам базовые теоретические установки по тем или иным вопросам. Этим они и важны для учебников, поскольку дают студентам основные теоретические подходы для решения различных практических вопросов инженерной геологии. Как же обстоит дело с фундаментальностями в учебной литературе, вышедшей за последние двадцать лет?

Начнем анализ с учебной литературы, вышедшей под названием «**Инженерная геология**».

Во многих учебниках по инженерной геологии, особенно изданных для среднего профессионального образования (СПО), инженерная геология излагается, начиная с общих сведений по геологии, строению Земли, геологическим процессам и т.п. [11,12,13,37,38,41,42]. При этом на вопросы собственно инженерной геологии остается мало места, и они излагаются на примитивном уровне или весьма кратко без фундаментальных положений и их анализа. Многие из таких учебников скорее похожи на учебники по общей геологии, чем на учебники по инженерной геологии. Ряд их авторов плохо представляют себе объект и предмет исследований этой науки, её структуру, номологические и методологические основы.

К сожалению, можно перечислить лишь единичные учебные издания по инженерной геологии, в которых рассматриваются фундаментальности этой науки, излагаются номологические и методологические основы. К ним, безусловно, относится учебное пособие Г.К.Бондарика и Л.А.Ярг, вышедшее в 2015 г. [6], и учебное пособие В.А.Королева, вышедшее в 2020 г. [23].

Однако, лишь некоторые учебники по инженерной геологии [6,15,17,50,51] рассматривают вопросы методики и методологии этой науки, а также методики инженерно-геологических изысканий. Весьма подробно виды инженерно-геологических изысканий для разных видов работ представлены в пособии А.П.Неволина [35].

В целом ряде учебных изданий по инженерной геологии [7,8,18,19,34,37,38,40 и др.] рассматриваются лишь два ее направления: грунтоведение и инженерная геодинамика, а третье научное направление – региональная инженерная геология, не излагается или даже вообще не упоминается. Одним из первых и единственным учебником по инженерной геологии, в котором рассматривались все три её научных направления, был учебник Е.М.Сергеева 1982 г. В 2011 и 2014 гг. вышло стереотипное переиздание этого учебника [43]. В пособии В.С.Чувакина [50] также рассматриваются все три научных направления. Во многих же других изданиях по инженерной геологии [44] дается характеристика лишь вопросов инженерной геодинамики, а такие направления как грунтоведение и региональная инженерная геология вообще не рассматриваются. Всё это свидетельствует о низком качестве многих учебных изданий по инженерной геологии, отсутствию в них фундаментальности.

В стране ежегодно защищаются (хотя и не часто) докторские диссертации и десятки кандидатских диссертаций по инженерной геологии. Все они содержат новые научные положения в виде открытых и выявленных закономерностей, обобщений, методик, законов и т.п. Однако в учебную литературу по инженерной геологии они своевременно не входят, поэтому многие учебники устаревают, не успевают за развитием современной инженерной геологии.

Отметим и еще один важный недостаток: во многих учебниках по инженерной геологии содержатся терминологические неточности, а порой и грубые терминологические ошибки. Нередко даются неверные определения самой инженерной геологии, ее научных направлений, процессов и т.п. Между тем терминология любой науки составляет ее основу, является элементом её фундаментальности, образует её категориальный базис. Научные термины не допускают вольного обращения. От правильности и обоснованности научных определений зависит очень многое. Но, к сожалению, многие авторы допускают ошибки в определении терминов разного характера, что для учебной литературы должно быть исключено. Для устранения этого недостатка кафедрой инженерной и экологической геологии МГУ была издана монография с выверенными формулировками наиболее важных, базовых инженерно-геологических терминов [4]. Книга оказалась чрезвычайно востребованной не только среди специалистов инженер-геологов, но и среди студентов и аспирантов. Кроме того, этой же кафедрой в 2013-2015 гг. издано фундаментальное 3-томное издание «Инженерная геология России» [13], которая также должна использоваться для создания учебников по инженерной геологии.

Другим недостатком многих учебников по инженерной геологии является то, что фундаментальность материала в них часто заменяется положениями нормативного характера - переписанными разделами из ГОСТов, СП и иных нормативно-методических документов. Безусловно, учебники должны знакомить студентов с действующими нормативными документами, но они не должны подменять собой фундаментальные положения инженерной геологии.

Рассмотрим теперь как обстоит дело с учебными изданиями по основным научным направлениям инженерной геологии. Начнем с первого направления – **грунтоведения**.

Можно констатировать, что по сравнению с другими направлениями инженерной геологии, с учебной литературой по грунтоведению дело обстоит хорошо, в том числе и с точки зрения отражения в них фундаментальности. Примером здесь, безусловно, является 6-е издание учебника «Грунтоведение», вышедшее в МГУ [9]. Сейчас готовится его обновленное 7-е издание, учитывающее мировые достижения грунтоведения за последние пятнадцать лет. Этот учебник, как и предыдущие его издания, в полной мере содержит фундаментальные положения современного грунтоведения, опирается на фундаментальные методологические положения и номологическую базу. Этот учебник подкрепляется и серией учебных изданий по практическим методам изучения грунтов, анализа их состава, строения, состояния и свойств [10,30-32], а также учебниками и учебными пособиями по изучению отдельных категорий грунтов [24,36,48].

Фундаментальность учебника «Грунтоведение» [9] сильно повлияла на издание после 2005 г. учебной литературы с таким же названием: авторы разных вузов стали его активно использовать при подготовке собственных изданий «Грунтоведения». В ряде учебников по грунтоведению и инженерной геологии дается краткое, но порой дословное переизложение целых разделов 6-го издания учебника «Грунтоведение» [25-29, 50]. Особенно много такого «переизложения» в учебниках В.В.Крамаренко – с 2011 по 2021 гг. она издала шесть учебников и пособий по грунтоведению [25-28].

Авторы не против заимствований, если они делаются по правилам. Между тем, например, в пособии [25] целые абзацы и страницы дословно повторяют учебник «Грунтоведение» [9] без ссылок

на него, а многие рисунки, взятые из этого учебника, даны без ссылок на него. Кроме того, систематика свойств дается не верно: физико-химические свойства отсутствуют, вместо них – гидрофизические; пропали такие важные свойства как адсорбционные и ионообменные, просадочность попала в гидрофизические свойства вместе с фильтрационными; пучинистость – в теплофизические свойства и т.п. В своем учебном пособии [25] на стр. 139 В.В.Крамаренко называет Аттерберга «шведским специалистом по механике грунтов», тогда как он таковым никогда не был. Альберт Мауриц Аттерберг (1846-1916) был шведским химиком и агроном-почвоведом. А внедрение предложенного им метода определения пределов пластичности в геотехнику произошло сначала в США благодаря работам 1920-х гг. К.Терцаги и затем - его ученика и коллеги А.Казагранде в начале 1930-х гг. В этот же период этот метод стал внедряться в грунтоведение и в СССР. Подобных недочетов в этом и других пособиях В.В.Крамаренко можно указать много. Нельзя допускать явных ошибок при «переизложении», особенно фундаментального характера, которые, к сожалению, присутствуют в большом количестве в изданиях В.В.Крамаренко.

В учебных изданиях по **инженерной геодинамике** также наблюдается большое количество недостатков. Большинство авторов сводит инженерную геодинамику к экзогеодинамике, не включая в рассмотрение инженерно-геологический анализ эндогенных процессов – эндогеодинамические и техно-геодинамические процессы упущены [см. например, 1-3,5 и др.]. Кроме того, лишь в некоторых изданиях в перечне экзогенных процессов анализируются криогенные (мерзлотные) процессы.

Описательный характер изложения вопросов, отличающий многие учебные издания по инженерной геодинамике, превалирует над изложением фундаментальных вопросов этого направления – закономерностей развития процессов, природных и техногенных факторов их формирования, влияния на инженерно-геологические условия, вопросов прогнозирования и т.п. Лишь в единичных изданиях упоминается о законах инженерной геодинамики.

Но главный недостаток многих учебных изданий по инженерной геодинамике состоит в том, что в них дается лишь традиционный (общегеологический) анализ геологических процессов, а не инженерно-геологический, нацеленный на оценку инженерно-геологических условий строительства сооружений и предполагающий использование количественных показателей, прогнозные оценки, способы инженерной защиты и т.п.

Что же касается учебных изданий по **региональной инженерной геологии**, то, как отмечалось выше, их можно легко пересчитать: это учебное пособие Л.А. Ярг [52], а также отдельные разделы в некоторых учебных пособиях и учебниках по инженерной геологии [см. например, 50]. К сожалению, пособие Л.А.Ярг настолько краткое, что в нем отсутствуют многие, в том числе фундаментальные, положения региональной инженерной геологии.

В 2007 г. В.Т.Трофимов и Т.И.Аверкина издали монографию «Теоретические основы региональной инженерной геологии», получившую высокую оценку специалистов инженер-геологов за её фундаментальность. Назрело издание на её основе учебника для вузов под названием «Региональная инженерная геология».

Кроме отмеченных выше учебных изданий по инженерной геологии и ее научным направлениям, интересны вышедшие за последнее время издания, имеющие узкую направленность, например, для реставрации сооружений [39], для строительства дорог и аэродромов [2], инженерно-геологической экспертизе [47], практическим заданиям [49] и др.

Общий недостаток издания учебников по инженерной геологии за последние двадцать лет – отсутствие единых правил присвоения грифа изданиям, сопровождаемого экспертизой и обязательным рецензированием рукописей ведущими инженер-геологами и кафедрами, выпускающими инженер-геологов. Как известно, «грифование» учебных изданий Министерством высшего образования отменено и было возложено на соответствующие учебно-методические объединения (УМО), а позже – на учебно-методические советы (УМС) и Федеральные учебно-методические объединения (ФУМО) по высшему образованию. Таким образом, сейчас гриф высшей квалификации могут присваивать лишь ФУМО. Для этого Минвузом были разработаны соответствующие правила и требования.

В 2019 г. было утверждено «Временное положение о порядке экспертизы качества учебных изданий Федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненным группам специальностей и направлений подготовки 05.00.00 Науки о Земле». Согласно этому положению, действующему в настоящее время, экспертиза качества учебных изданий проводится ФУМО с привлечением уполномоченных организаций – географического и геологического

факультетов МГУ имени М.В.Ломоносова. В качестве экспертов могут выступать: представители образовательных организаций, ведущих обучение по соответствующему направлению (профилю) подготовки, имеющие ученую степень и/или ученое звание; представители профильных научно-исследовательских и проектных организаций, имеющие ученую степень и/или ученое звание; специалисты в соответствующей профессиональной области, имеющие стаж работы на руководящих должностях не менее 5 лет. А при проведении экспертизы качества учебных изданий экспертная комиссия по соответствующему направлению рекомендует уполномоченной организации для рецензирования учебного издания специалистов (не менее двух, при повторном издании – одного), входящих в реестр экспертов данного направления.

Однако, вместо этого сейчас гриф часто присваивается самими издательствами, ссылаясь на рекомендации некоторой «учебно-методической комиссии» при издательстве, как, например, поступают издательства «Юрайт», «Инфра-М» и многие другие издательства, зарабатывающие деньги на издании учебной литературы. Во многих случаях они руководствуются лишь получением прибыли, а не качеством учебной литературы. В итоге они издают массу учебной литературы, не способствующей подготовке высококвалифицированных специалистов в силу низкого качества содержания изданий. Сейчас можно легко издать учебную литературу фактически без какого-либо рецензирования и экспертизы, литературу компилятивного характера, с устаревшими представлениями об инженерной геологии. В итоге исчез ранее существовавший «фильтр», не пропускавший к изданию учебную литературу, которая не отвечала требованиям высшей школы по данной специальности.

Таким образом, проведенный анализ фундаментальности учебной литературы по инженерной геологии позволяет заключить, что:

1) за последние двадцать лет издано много учебников и учебных пособий по инженерной геологии, многие из которых, однако, не содержат фундаментальных положений этой науки и её отдельных научных направлений; при этом фундаментальность материала часто заменяется положениями нормативного характера (переписанными разделами из ГОСТов и иных нормативно-методических документов);

2) во многих учебниках по инженерной геологии приводится традиционный (общегеологический) анализ геологических процессов, а не инженерно-геологический, нацеленный на оценку инженерно-геологических условий и их влияния на условия строительства инженерных сооружений;

3) отмечается некоторый дисбаланс в издании учебной литературы по отдельным научным направлениям инженерной геологии, в частности недостаток таковой по региональной инженерной геологии;

4) необходимо строго руководствоваться положением Минвуза о присвоении грифов УМС учебной литературе по инженерной геологии.

Литература

1. Ананьев В.П., Потапов А.Д. *Инженерная геология: Учеб. для строит. спец. вузов / 3-е изд. – М.: Высш. шк., 2005. – 575 с. (1-е изд. – 2000. - 511 с.)*
2. Ананьев В.П., Потапов А.Д., Филькин Н.А. *Специальная инженерная геология: учеб. для вузов – М.: Высш. школа, 2008. – 264 с. (2-е изд.: М.: Инфра-М, 2017. – 320 с.)*
3. Ананьев В.П., Потапов А.Д., Юлин А.Н. *Инженерная геология: Учебник – М.: Инфра-М, 2016. - 576 с.*
4. *Базовые понятия инженерной геологии и экологической геологии: 280 основных терминов / под ред. В.Т. Трофимова / В. Т. Трофимов, В. А. Королёв, М. А. Харьковина и др. — М.: ОАО Геомаркетинг, 2012. — 320 с.*
5. Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А. *Инженерная геодинамика / Учебник для вузов, 3-е изд. – М.: КДУ, 2015. – 472 с. (1-е изд.: М.: КДУ, 2007. – 456 с.; 2-е изд.: М.: КДУ, 2009. – 439 с.)*
6. Бондарик Г.К., Ярг Л.А. *Инженерная геология. Вопросы теории и практики. Философские методологические основы геологии: уч. пособие. – М.: КДУ, 2015. – 295 с.*
7. Гальперин А.М., Зайцев В.С. *Инженерная геология: Учебник для вузов – М.: Горная книга, изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2009. – 559 с.*
8. Гальперин А.М., Зайцев В.С., Мосейкин В.М., Пуневский С.А. *Гидрогеология и инженерная геология: Учебник для вузов – М: Изд-во МИСИС, 2019. – 424 с.*

9. Грунтоведение // Под ред. В.Т. Трофимова – 6-е изд., перераб. и дополн. (серия Классический университетский учебник) / В. Т. Трофимов, В. А. Королёв, Е. А. Вознесенский и др. — М.: Изд-во МГУ и Наука, 2005. — 1024 с.
10. Дмитриев В.В., Ярг Л.А. Методы и качество лабораторного изучения грунтов: учеб. пособие для вузов - М.: КДУ, 2008. - 542 с.
11. Добров Э.М. Инженерная геология / Учебник, 3-е изд. — М.: Академия, 2013. — 224 с. (Инженерная геология: Уч. пособие для вузов — М.: Academia, 2008. — 224 с.)
12. Захаров М.С., Корвет Н.Г., Николаева Т.Н., Учаев В.К. Почвоведение и инженерная геология: Учеб. пособие, 2-е изд. стереотип. — СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2018, - 256 с. (1-е изд. 2016 г.)
13. Инженерная геология России / В 3-х томах. —Т.1. Грунты России / Под ред. В.Т. Трофимова, Вознесенского Е.А., Королева В.А. - М.: КДУ. 2011. — 672 с.; Т.2. Инженерная геодинамика территории России / Под ред. В.Т. Трофимова и Э.В. Калинина. — М.: КДУ, 2013. — 816 с.; Т.3. Инженерно-геологические структуры России / В. Т. Трофимов, Т. И. Аверкина, Т. В. Андреева и др. — М.: КДУ, 2015. — 710 с.
14. Ипатов П.П., Строкова Л.А. Общая инженерная геология: учебник для вузов – Томск, Изд-во ТПУ, 2012. - 365 с.
15. Казарновский В.Д. Основы инженерной геологии, дорожного грунтоведения и механики грунтов. Краткий курс: Учеб. пособие для вузов. — М.: Интрансдорнаука, 2007. — 284 с.
16. Калинин Э.В. Инженерно-геологические расчеты и моделирование. / Учебник. — М.: Изд-во Московского университета. 2006, - 256 с.
17. Кашперюк П.И., Манина Е.В., Макеева Т.Г., Юлин А.Н. Инженерные изыскания в строительстве. Инженерная геология и геоэкология / Учеб. пособие. — М.: Инфра-Инженерия, 2021. — 152 с.
18. Кимкина В.М. Основы гидрогеологии и инженерной геологии /Уч. пособие для студентов СУЗ – М.: Издательские решения, 2019. — 98 с.
19. Коробкин В.И., Передельский Л.В. Инженерная геология и охрана природной среды: Учебник для вузов – Ростов-на-Дону: РУ, 2011. - 348 с. (2-е изд., стереотип., 2013 г.).
20. Королев В.А. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений: учеб. пособие / Под ред. В.Т. Трофимова – М.: КДУ, 2013. — 470 с.
21. Королёв В.А. Инженерная и экологическая геодинамика. / Электронный учебник на CD [электронный ресурс]. — М.: МГУ, 2004
22. Королев В.А. Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем: Уч. пособие / Под ред. В.Т. Трофимова – М.: КДУ, 2007. — 415 с.
23. Королёв В.А. Методология научных исследований в инженерной геологии / Уч. пособие. — М.: ООО Самполиграфист, 2020. — 353 с.
24. Королёв В.А. Термодинамика грунтов / Учебник для вузов, 2-е изд. — М.: ООО Сам полиграфист, 2016. — 258 с. (1-е изд. — М.: Изд-во МГУ, 1997. — 167 с.)
25. Крамаренко В.В. Грунтоведение / Уч. пособие. — Томск, Изд-во ТПУ, 2011. - 431 с. [электронный ресурс; URL: <https://portal.tpu.ru/files/personal/kramarenko/01.pdf>]
26. Крамаренко В.В. Грунтоведение / Учебник для академического бакалавриата. Сер. «Университеты России» - М.: Юрайт, 2016 и 2021. — 430 с.
27. Крамаренко В.В. Грунтоведение / Учебник для СПО. Сер. «Профессиональные комментарии — М.: Юрайт, 2021. — 430 с.
28. Крамаренко В.В. Грунтоведение / Учебник. Сер. «Университеты России») - М.: Юрайт, 2017. — 432 с.
29. Крамаренко В.В. Методические указания к выполнению лабораторных, индивидуальных и самостоятельных работ по курсу «Грунтоведение» для студентов, обучающихся по направлению 130101 «Прикладная геология» специализация 130302 «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания» – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. — 205 с.
30. Лабораторные работы по грунтоведению / Уч. пособие, 2-е изд. / Под ред. В.Т. Трофимова и В.А.Королёва / В. Т. Трофимов, В. А. Королёв, Е. А. Вознесенский и др. — Высшая школа Москва, 2008. — 519 с.
31. Лабораторные работы по грунтоведению: уч. пособие / Под ред. В.Т. Трофимова и В.А.Королёва, изд. 3-е испр. и доп. / В. А. Королёв, В. Т. Трофимов, Е. Н. Самарин и др. — КДУ Москва, 2017. — 654 с.
32. Лабораторный практикум по грунтоведению: Учебное пособие / Под ред. В.А. Королёва, В.Н. Широкова и В.В. Шаниной / В. А. Королёв, С. К. Николаева, В. Н. Широков и др. — М.: КДУ, Добросвет, 2019. — 240 с. [URL: <https://bookonlime.ru/node/4701>. — doi: 10.31453/kdu.ru.91304.0086]

33. Лолаев А.Б., Бутюгин В.В. *Инженерная геология и грунтоведение: учеб. для СПО.* – Ростов-на-Дону, Феникс, 2017. – 350 с. (1-е изд.: 2016 г. – 160 с.).
34. Ломачевская Е.Д. *Гидрогеология и инженерная геология [Электронный ресурс]: учеб. пособие* – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009.
35. Неволин А.П. *Инженерная геология. Инженерно-геологические изыскания для строительства: учеб. метод. пособие* – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 85 с.
36. Огородникова Е.Н., Николаева С.К. *Техногенные грунты / Уч. пособие, 2-е изд.* – М., Изд-во РУДН, 2017. – 631 с. (1-е изд. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 250 с.)
37. Ольховатенко В.Е., Трофимова Г.И. *Основы инженерной геологии: уч. пособие* – Томск, изд-во ТГАСУЮ 2016. – 192 с.
38. Осипова М.А. *Инженерная геология: Учеб. пособие для вузов [цифровая книга]* – Барнаул: Межрегиональный центр электронных образовательных ресурсов. 2016. – 127 с.
39. Пашкин Е.М. *Инженерная геология (для реставраторов): учеб. пособие для вузов* – М.: Архитектура-С, 2005. – 264 с.
40. Передельский Л.В., Приходченко О.Е. *Инженерная геология: Учебник для студ. строит. спец. вузов* – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 448 с.
41. Платов Н.А. *Основы инженерной геологии / Учебник для СПО* – М.: Инфра-М, 2011. – 174 с. (Основы инженерной геологии / Учебник для СПО. – М.: Инфра-М, 2005. – 174 с.)
42. Платов Н.А., Касаткина А.А. *Основы инженерной геологии, геоморфологии и почвоведения / Уч. пособие для СПО* – М.: Академия, 2012. – 144 с.
43. Сергеев Е.М. *Инженерная геология: Уч. для вузов / 3-е изд. стереотипное* – М.: ИД Альянс, 2011. – 248 с. (4-е изд. стереотипное – 2014. – 248 с.)
44. Симагин В.Г. *Инженерная геология: Уч. пособие для вузов* – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 265 с.
45. Трофимов В.Т. *Инженерная геология массивов лёссовых пород: учеб. пособие* – М.: КДУ, 2008. – 398 с.
46. Трофимов В.Т., Красилова Н.С. *Инженерно-геологические карты: учеб. пособие* – М.: КДУ, 2008. – 383 с.
47. Фоменко И.К., Самарин Е.Н., Зеркаль О.В. *Учебное пособие по курсу «Инженерно-геологическая экспертиза».* – М.: Перо, 2020. – 256 с.
48. Фролова Ю.В. *Скальные грунты и методы их лабораторного изучения: учебное пособие для вузов.* – М.: КДУ, 2015. – 220 с.
49. Чернышов С.Н., Чумаченко А.Н., Ревелис И.А. *Задачи и упражнения по инженерной геологии: учеб. пособие для вузов 2-е изд.* – М.: Высшая школа, 2001. – 245 с.
50. Чувакин В.С. *Основы инженерной геологии: уч. пособие. 3-е изд.* – Томск: Изд. дом Томского гос. ун-та, 2017. – 136 с.
51. Юлин А.Н., Кашперюк П.И., Манина Е.В. *Инженерная геология и геоэкология: учеб. пособие / 2-е изд., электронное [электронный ресурс]* – М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2017. – 125 с.
52. Ярг Л.А. *Региональная инженерная геология: учеб. пособие* – М.: КДУ, 2016. – 188 с.

2. ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ГРУНТОВ В ПРАКТИКЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

НАСЫПНЫЕ ГРУНТЫ ПЕТРОВСКОГО БАСТИОНА ПСКОВО-ПЕЧЕРСКОГО МОНАСТЫРЯ

Н.В. Абакумова¹, И.В. Аверин², С.К. Николаева¹, Н.П. Камышанова¹

¹МГУ им.М.В. Ломоносова, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1. E-mail: abakumova.nv@mail.ru

²ООО «Инженерная Геология», г. Москва, Ярцевская ул., д. 16. E-mail: i.averin@mail.ru

Историческая справка. Свято-Успенский Псково-Печерский монастырь – один из самых крупных в России мужских монастырей с многовековой историей, возникший еще в XV веке вначале как пещерный монастырь. Расположенный на границе между Россией и Ливонией (позже Швецией), он не раз подвергался разорению со стороны немцев, шведов и поляков [8]. С началом Северной войны в 1701 г. по распоряжению Петра I были проведены масштабные работы по укреплению обороноспособности монастыря. Были отсыпаны перед крепостными стенами земляные бастионы (названы Петровскими) с валами, раскатами и заполненными водой рвами. Бастионы изначально пятиугольной формы предназначались для размещения артиллерийских орудий [5]. Возведение фортификационных сооружений производилось под руководством приглашенных европейских инженеров [6]. Остатки земляных укреплений сохранились, следовательно, возраст насыпи уже более 320 лет.

Объекты исследования. В настоящее время Петровский земляной бастион представляет собой холм высотой примерно 10 м с изометричным в плане основанием диаметром 36 м (площадью около 4000 м²), крутыми склонами под 17-35°, почти плоской вершиной размером 40x20 м (площадью ок. 780 м²), трапециевидным профилем. По нашим расчетам в насыпь было уложено около 22 тыс. м³ грунта.

Скважиной, пройденной ООО «Инженерная геология» в центральной части Петровского бастиона, вскрываются насыпные пески, подстилаемые перемещенными и уложенными глинистыми грунтами, на глубине около 10 м подстилаемыми отложениями осташковской морены (gQ₃⁴os).

Объектами исследования стали отобранные из керна скважины с интервалом в 1 м образцы насыпных грунтов и морены. Поскольку ледник двигался по девонским красноцветным песчаникам, обогащал морену песчаным материалом ржаво-красного и палевого оттенков, то и отложения морены, и перемещенные в насыпь грунты имеют тот же цвет и близки по макроописанию. Это суглинки от полутвердых до тугопластичных и супеси от твердых до пластичных, красновато-коричневые песчанистые с включением гальки и щебня до 3%.

Минеральный состав насыпных грунтов рассматривается ниже в сравнении с подстилающими моренными суглинками осташковского оледенения (gQ₃⁴os), а также коренными швентойскими песчаниками и глинами (D₃šv). Сравнительный анализ однозначно свидетельствует о существенных различиях состава техногенных грунтов и швентойских отложений, которые не могли служить материалом для создания насыпи, и, наоборот, об их сходстве с составом природных моренных суглинков, имеющих приповерхностное залегание и, вероятно, вскрытых при создании оборонительного рва вокруг монастыря и использованных для возведения насыпей под артиллерийские орудия (таблица).

Мелкообломочные фракции в насыпных грунтах представлены преимущественно первичными силикатами. Преобладает кварц, содержание которого убывает с глубиной от 72 до 54%, что несколько меньше по сравнению с моренными суглинками (78%). Суммарное количество альбита и микроклина 19-21% в 3-4 раза больше, чем в моренных суглинках. Во всех случаях микроклин преобладает над альбитом. Карбонаты присутствуют в отдельных образцах и, вероятно, не харак-

<i>Таблица.</i>						
Минеральный состав насыпных и подстилающих грунтов (вес. %)						
Объекты исследования	Насыпные суглинки и супеси, tQ ₄ ^H			Супесь, gQ ₃ ^{4os}	Песчаник, D ₃ šv	Глина, D ₃ šv
	2 м	5 м	8 м	12 м	3-21 м	4-10 м
Минералы						
Кварц	72,3	66	54,5	77,7	90-95	31-35
Плагиоклаз (Альбит)	5,6	5,9	8,4	2,2	-	0-6
КПШ (Микроклин)	13,7	15,5	10,9	4,3	0-6	5-6
Амфибол	0,4	1	1,4	-	-	-
Кальцит	-	-	2,5	1,3	-	-
Доломит	-	-	2,9	-	0-2	0-4
Каолинит	-	1,3	1,2	2	-	8
Иллит	4,1	4,3	6	5,3	-	-
Хлорит	0,8	0,4	1	-	-	1
Смектит	3,1	5,6	11,2	7,2	-	3
Слюда	-	-	-	-	2-3	22-24
Слюда-смектит	-	-	-	-	0-2	2-6
Антигорит	-	-	-	-	-	0-4
Роговая обманка	-	-	-	-	0-1	0-1
Сидерит	-	-	-	-	-	2-4
Гематит	-	-	-	-	-	2-6
Гётит	-	-	-	-	-	следы
Примечание: 1) указана глубина отбора средних проб (м); 2) использованы данные рентгеновской дифрактометрии.						

терны (дополнительное определение кальциметром дало содержание 0,3-3,1% и неравномерное распределение по разрезу).

Содержание глинистых минералов в теле насыпи с глубиной возрастает от 8 до 19% и в среднем соответствует их присутствию в моренных суглинках. Во всех исследованных образцах, природных и техногенных, отмечен один тип ассоциации глинистых минералов [7]: смектит > иллит > каолинит, хлорит, что подтверждает близость их минерального состава.

Содержание органического вещества мало, не превышает 0,28% в насыпных грунтах и 0,31% в оставковской морене.

По данным водной вытяжки (рН 7,2-7,8) образцы незасоленные, сухой остаток 0,07-0,12%. Насыпные грунты сформированы, как полагаем, переотложенной оставковской мореной, для которой свойственна низкая засоленность. Значения щелочности соответствуют содержанию бикарбонатов. Обращает внимание повышенное содержание хлоридов и сульфатов щелочей по сравнению с бикарбонатами. Не исключено некоторое засоление из-за применения антигололедных средств в зимнее время, когда Петровский бастион служит прекрасной смотровой площадкой для обзора живописных окрестностей.

Строение грунтов. По гранулометрическому и микроагрегатному составам [2] грунты разреза Петровского бастиона можно разделить на три части. Самая верхняя (до глубины около 1,2 м) сложена песчаным грунтом средней крупности по ГОСТ 25100-2020 или песком чистым, бидисперсным, мелко-среднезернистым по Е.М. Сергееву [4], однородным по дисперсности, с незначительной примесью (5%) пылеватых частиц.

Средняя, основная часть разреза (1,2-10 м) сложена перемещенными глинистыми грунтами. По гранулометрическому составу это супеси тяжелые и суглинки легкие по В.В.Охотину [4]. Содержание песчаных частиц закономерно варьирует в пределах 59-67%, в среднем составляет 62%.

Во всех случаях количество мелких зерен превалирует над средней и тонкой песчаными фракциями. Пылеватые фракции составляют 23-32% (в среднем 28%), глинистых частиц размером <0,002 мм в основном 9-10%. Грунты весьма неоднородны по первичной дисперсности.

По результатам микроагрегатного анализа грунты более однородны. Содержание групп фракций варьирует: песчаных 60-74% (в среднем 69%); пылеватых 24-40% (в среднем 31%); глинистых частиц нет – все они участвуют в формировании агрегатов. Вниз по разрезу меняется характер агрегированности. Если на глубине 2 м (возможно, это глубина сезонного промерзания) агрегаты частиц имеют размеры 0,01-0,25 мм, в интервале 3-4 м агрегаты размером 0,05-0,1 мм, в интервале 5-6 м 0,002-0,1 мм, то ниже по разрезу преобладающие размеры агрегатов 0,05-0,1 мм и 0,01-0,002 мм. Средний коэффициент агрегированности частиц <0,005 мм составляет 2,7, что свидетельствует о преобладании коагуляционно-цементационных связей между частицами в агрегатах [1].

Отложения осташковской морены представлены по гранулометрическому составу супесью тяжелой. По сравнению с описанными выше насыпными грунтами в них 71% песчаных частиц (преобладают средняя и мелкая фракции), 23% пылеватых и 6% глинистых частиц. Коэффициент неоднородности 27, что в 2 раза меньше, чем его средняя величина для насыпных грунтов. По данным микроагрегатного анализа песчаная и пылеватая группы фракций составляют 79 и 21% соответственно. Наибольшее количество агрегатов имеют размеры 0,05-0,1 мм, также имеются агрегаты во фракции 0,01-0,002 мм. По характеру и значению коэффициента агрегированности (2,3) насыпные и моренные грунты однотипны.

Важно отметить то обстоятельство, что все изученные образцы насыпных грунтов и осташковской морены имеют близкую дисперсность и относятся к так называемым «оптимальным грунтовым смесям» (рисунок). Благодаря определенным сочетаниям содержания песчаных зерен (образуют скелет или каркас грунта), пылеватых (служат заполнителем) и глинистых (связующих) частиц такие грунты имеют наибольшую плотность.

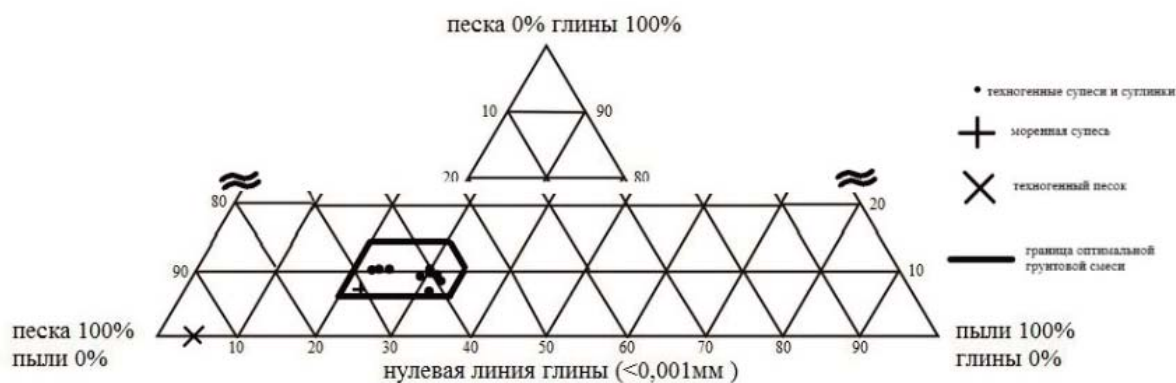


Рис. Соотношение содержания песчаной, пылеватой и глинистой групп фракций исследуемых образцов.

Изучение песчаных фракций, выделенных мокрым просеиванием при микроагрегатном анализе под биноклем LevenhukDTX 500 LCD, выявило преобладание обломочных зерен кварца разной округлости, прозрачности, дефектности и т.д. Встречаются обломки полевых шпатов, примесных темноцветных минералов, в том числе, рудных, с металлическим блеском, а также обломки очень сильно выветрелых пород и агрегаты мелких кварцевых зерен, «цементированные» аморфным веществом.

Исследования с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) показали в целом однотипное строение природного и насыпных грунтов. Характерны плотные агрегаты, образованные песчаными и пылеватыми частицами с глинистыми «рубашками», контакты между ними глинистые. При крупном увеличении по краю глинистого контакта заметна пленка, возможно, выполняющая роль цемента. Преобладают контакты точечного типа. При небольших увеличениях на образцах с глубины 5 и 7 м видна своеобразная сотовая микроструктура с почти равномерным распределением изометричных пор размером 10-50 мкм. Встречаются относительно плотные микроблоки, разделенные порами. Иногда мелкие поры «трассируют» микротрещины усадки, оконтуривающие отдельные блоки. Более крупные поры сложной конфигурации, вероятно, служат путями миграции воды. По краям таких пор отмечены тонкая железистая пленка (зафиксирована с помощью микро-

анализатора состава; образуется при медленном течении воды) и светлые каемочки новообразованного минерального вещества. По анализу РЭМ-изображений можно предположить, что за счет циклических процессов набухания и усадки в небольшом по объему насыпном массиве сформировалась агрегированная структура, похожая на лёсс.

Состояние и свойства грунтов. В природном состоянии на момент изысканий (июнь) влажность 9-14%, насыпные грунты твердые, полутвердые и тугопластичные, причем показатель текучести сначала возрастает, в интервале 5-7 м достигает максимальных значений (0,30-0,34), а затем снова убывает (до 0,09). Это обусловлено слоистостью толщи, взаимосвязью состава, дисперсности и вододерживающей способности.

По числу пластичности и с учетом содержания песчаных частиц [3] насыпные грунты относятся к супесям и легким суглинкам песчанистым. Пределы раскатывания 11-12%, текучести 16-19% вполне согласуются с данными минерального состава и дисперсности.

Плотность частиц насыпных грунтов составляет 2,66-2,81 г/см³, у морены 2,66-2,69 г/см³.

Нормативные значения плотности насыпных грунтов по данным изысканий (для инженерно-геологических элементов) 2,08 г/см³, тогда как для моренных супесей пластичных 2,11 г/см³. Плотности скелета, соответственно, 1,84 и 1,89 г/см³. Пористость у насыпных грунтов в среднем 32%, для природных моренных супесей 30%.

Исследование набухаемости некоторых образцов насыпных грунтов показало, что при начальной влажности, соответствующей воздушно-сыхому состоянию, относительная деформация набухания составляет 0,08-0,14 д.е., а влажность набухания существенно выше верхнего предела пластичности – 22-26%. Величина усадки грунтов с естественной влажностью может составлять 1-5%.

Сопротивление сдвигу по данным изысканий характеризуется следующими нормативными значениями показателей: угол внутреннего трения (град.) для насыпных 20, моренных супесей 26; сцепление (кПа) 28 и 20, соответственно. Модуль деформации для насыпных супесей и суглинков 21 МПа, моренных 26 МПа. То есть прочностные и деформационные показатели насыпных и природных грунтов соизмеримы.

Заключение. Определяющим фактором формирования свойств массива насыпных грунтов является их дисперсный состав, отвечающий оптимальной смеси. Достоверных данных нет, но можно предположить, что в самом начале XVIII века при возведении земляных фортификационных сооружений использовались местные природные грунты, а не специально составленные искусственные смеси. Вероятно, брались залегающие с поверхности моренные отложения или делювиальные, слагающие склон оврага. Скорее всего, использовалась послойная отсыпка с уплотнением грунта – прообраз землебитной технологии, получившей ограниченное распространение уже к концу века. Создавалась деревянная опалубка, внутрь нее засыпали грунт, поливали водой и уплотняли (били чушками), могли делать доупорные слои. Вода отжималась наружу деревянных клетей, а грунт оставался.

Происходили коагуляция высокодисперсных частиц и их адсорбция на поверхности песчаных зерен, что подтверждают данные микроскопии. Возможно, часть водостойких агрегатов морены унаследовано сохранялась, но образовывались и новые агрегаты частиц. Возникали прочные цементационные контакты, были обеспечены высокие плотность и прочность грунтов, а также устойчивость всего сооружения в целом.

За долгую историю существования земляного массива насыпные грунты изменялись процессами выветривания. С учетом песчаного (в верхней части) и легкого супесчано-суглинистого состава насыпных грунтов в массиве существовал промывной режим с преобладанием атмосферных осадков над испарением, нисходящим движением воды. Периодические увлажнение и высыхание неизбежно приводили к деформациям набухания и усадки. Сравнительно небольшой массив грунтов многократно подвергался промораживанию-оттаиванию. Присутствующие в песках полевые шпаты могли в небольшом количестве перейти в аморфные гидроксиды алюминия и кремния. Преобразования затрагивали и глинистое вещество. Происходили микроструктурные изменения. Менялись свойства грунтов.

В XXI веке монастырь стал крупным паломническим и туристическим центром. Петровский бастион является ныне достопримечательностью. Прямо у его подножья проходит асфальтированная дорога, эксплуатируемая посетителями монастыря и местными жителями. Активное и разностороннее внешнее воздействие (вырубка деревьев на склоне и его подрезка, низкочастотная вибрация от движущегося транспорта) привели к развитию деформаций на откосах, «расплыванию» контуров.

Детальное изучение и понимание процессов, происходящих в столь древнем насыпном массиве, мониторинг его состояния и, возможно, разработка и применение мер по укреплению позволят сохранить этот уникальный рукотворный памятник отечественной истории.

Авторы благодарны В.В. Крупской, С.В. Закусину, С.А. Гараниной, а также М.С. Чернову за возможность использовать данные уникального оборудования. Работы выполнены с использованием рентгеновского дифрактометра ULTIMA-IV, растрового электронного микроскопа LEO 1450 VP, оснащенного энергодисперсионным спектрометром INCA 300, приобретенных за счет средств Программы развития Московского университета имени М.В. Ломоносова.

Литература

1. Горькова И.М. Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. М.: Стройиздат, 1975. 151 с.
2. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2015. 24 с.
3. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 38 с.
4. Грунтоведение / Под ред. В.Т.Трофимова. – М.: Наука, МГУ, 2005. 1024 с.
5. Скрипинская Н.Ю. Как возникли русские бастионы? Из истории становления отечественных крепостей // Родина. 2015. № 7. С. 103-107
6. Славнитский Н.Р. Французские и немецкие инженеры в крепостях Северо-Запада России в первые годы XVIII века // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2016. № 7-1 (160). С. 25-27
7. Шлыков В.Г. Рентгеновский анализ минерального состава дисперсных грунтов. М.: ГЕОС, 2006. 176 с.
8. <http://www.patriarchia.ru/db/text/3727347.html> (дата обращения 03.11.2021)

ИЗУЧЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН ПРИ ОБОСНОВАНИИ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТОКСИЧНЫХ ОТХОДОВ

М.В. Вилькина, А.М. Никуленков, В.Г. Румынин

Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН,
г. Санкт-Петербург, В.О., Средний пр., д. 41, оф. 519, 199004, РФ,
E-mail: wilkina.mari@hgepro.ru, annik@hgepro.ru, rumynin@hgepro.ru

На территории Тосненского района Ленинградской области с 1969 г. располагается полигон токсичных промышленных отходов «Красный Бор». Толща «синих» кембрийских глин, которая выходит на дневную поверхность, была выбрана в качестве среды для размещения опасных отходов.

Мощность кембрийских глин на участке исследования достигает 90 м – от дневной поверхности их отделяют четвертичные отложения мощностью от 3 до 8 м. В основании кембрийских глин залегает регионально выдержанный слой кембрийских песчаников, который образует напорный ломосовский водоносный горизонт (Рис. 1).

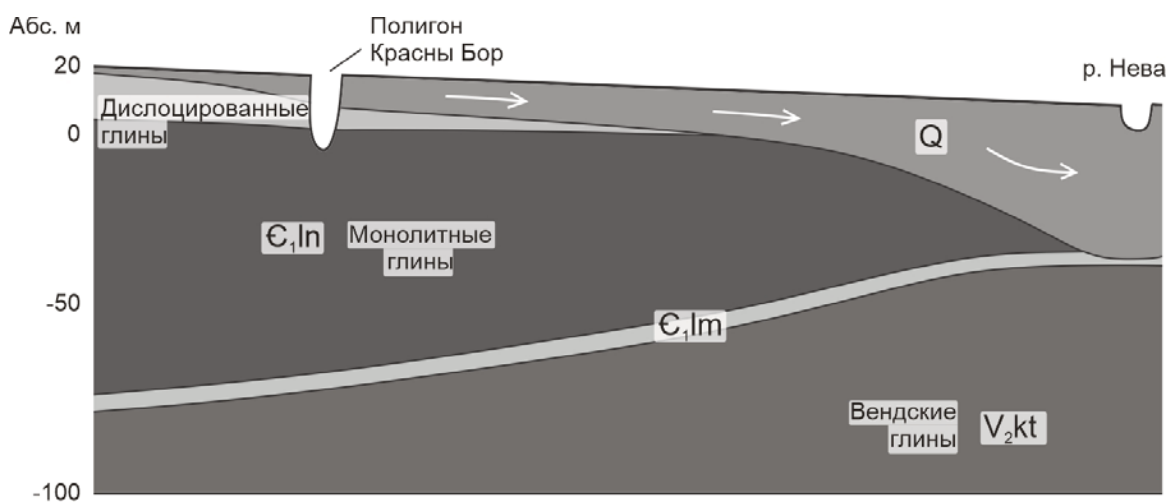


Рис. 1. Рисунок с разрезом локально по площадке.

За период эксплуатации с 1969 по 2014 гг. на территории полигона были организованы 70 выемок грунта (карт), вмещающие более 1,7 млн. тонн высокотоксичных отходов (Рис. 2). Промышленные отходы на полигон принимались как в жидком, так и в твердом состоянии. На сегодняшний момент 5 карт с жидкими отходами остаются открытыми, остальные были засыпаны грунтом.

При создании полигона считалось, что выбранное место удовлетворяет необходимым требованиям: отсутствует возможность подтопления территории в паводок, отсутствует централизованное водоснабжение из близлежащих водоемов, целевой горизонт глин обладает достаточной мощностью и залегает близко от поверхности. Но уже на этапе строительства был выявлен ряд проблем, который затруднил стабильную работу полигона и поставил под угрозу безопасность окружающей среды. В частности, возникли проблемы с организацией санитарной защитной зоны надлежащего радиуса, появился риск подтопления территории атмосферными осадками и талыми водами, сказалось наличие большого зеркала жидких отходов с открытой поверхностью и т.д. В последние годы эксплуатации участились пожары в связи с нарушением условий хранения высокотоксичных отходов.

В 2014 г. было принято решение о прекращении работы полигона и его полной рекультивации. Одна из главных задач рекультивации – не допустить распространения загрязнений из карт-накопителей в окружающую среду. В качестве проекта рекультивации было решено переработать содержимое открытых карт, а затем накрыть полигон сверху горизонтальным непроницаемым экраном, дополнительно создав по периметру противofильтрационную завесу, опущенную до кровли кембрийских глин.



Рис. 2. Схема расположения карт-накопителей полигона «Красный Бор».

В такой постановке вопрос о фильтрационных свойствах кембрийских глин начинает играть ключевую роль для долговременной безопасности рекультивируемого полигона.

Несмотря на многочисленные исследования кембрийских глин, их использование в качестве природного барьера до сих пор остается предметом научных дискуссий. В первую очередь, дискуссия обусловлена тем, что кембрийская глина проявляет дуализм в отношении фильтрационных и механических свойств, т.к. в зависимости от внешних условий она может быть проницаемой, или наоборот, выступать в качестве водоупора.

Существует два взгляда на барьерные свойства кембрийских глин. Например, Дашко Р.Э. и ее аспиранты рассматривают толщу кембрийских глин как блочную среду, которая, по их мнению, мало пригодна для изоляции отходов. Исследователи делают вывод о высокой проницаемости синих глин по трещинам, аргументируя это наличием соединений гидроксидов железа или гипса на стенках блоков [1], негативным влиянием микробной пораженности, приуроченной к трещинам [2], результатами полевых испытаний, а также оценивают коэффициент фильтрации трещиноватых зон по результатам наливов в карьере до 0,01–0,5 м/сут [2, 4].

Вторая группа исследователей из Санкт-Петербургского государственного университета не отрицает блочной структуры массива кембрийских глин, однако полагает, что трещины в кембрийских глинах находятся в сомкнутом состоянии, поскольку в естественном сложении они испытывают на себе литостатическое давление. Глины обладают набухающими свойствами, что позволяет им залечивать образованные трещины при контакте поверхности с водой. Кроме того исследования показали [5, 7, 8], что при контакте нефтепродуктов промхимотходов с кембрийскими глинами на поверхности породы образуется пленка, которая усиливает закупоривающую роль.

В работе [6] на региональной гидрогеологической модели оцениваются барьерные свойства кембрийских глин по разнице напоров между ломоносовским и кембро-ордовикским водоносными горизонтами. Было показано, что для поддержания существующей разницы напоров между горизонтами, коэффициент фильтрации разделяющего слоя (кембрийских глин) не должен превышать значения $1E-5$ м/сут. Таким образом, в региональном масштабе кембрийские глины должны рассматриваться как водоупорная толща.

Зарубежные исследователи указывают на то, что при проходке в глинах вокруг выработок образуются зоны разуплотнения (EDZ), которые в конечном счете могут приводить к увеличению коэффициента фильтрации этой зоны в среднем на порядок [8].

Для обоснования необходимых и достаточных проектных решений по локализации загрязнения в пределах полигона “Красный Бор” был проведен комплекс специализированных полевых и лабораторных исследований фильтрационной неоднородности кембрийских глин.

На первом этапе были визуально обследованы обнажения кембрийских глин в бортах карьера, который расположен в 480 м к западу от полигона Красный Бор. Отработка карьера производится на трех уровнях: на абсолютных отметках +15, 0 и -10 м. Отвод поверхностных и талых вод осуществляется дренажными канавами, собирающими воду в пруду на дне карьера.

Обследование карьера показало, что кембрийские глины в бортах имеют блочную структуру и разбиты системой ортогональных трещин. Одна система трещин ориентирована преимущественно в вертикальной плоскости, а другая - в горизонтальной (Рис. 3). Размеры блоков имеют выраженную тенденцию к увеличению с глубиной. Так, на верхней берме шаг сетки может сгущаться до 5-10 см, в то время как на нижней берме он увеличивается до нескольких десятков метров.



Рис. 3. Система ортогональных трещин кембрийских глин в борту карьера на абс. отметках от 0 до +15 м.

Высокая плотность сетки трещиноватости на верхней берме связана с тем, что приповерхностные слои глин оказались более дислоцированы, т.е. в прошлом были сильнее подвержены механическому воздействию ледника.

На втором этапе были проведены полевые работы непосредственно на полигоне Красный Бор, которые включали в себя бурение скважин и отбор монолитов кембрийских глин. В процессе бурения скважин, в отличие от обследования на карьере, в монолитах керна не было выявлено раскрытых трещин. Такие резкие отличия между состоянием трещиноватой системы в карьере и керне скважин объясняются условиями их залегания и влиянием внешних факторов. Отметим, что при хранении керна на поверхности через некоторое время (от нескольких суток до недель) монолитные образцы начинают растрескиваться, и в них проявляется система трещин, идентичная той, что наблюдается на карьере. Это связано с тем, что после извлечения монолитов на поверхность, с них снимается бытовое давление (формируются трещины отпора), а из-за потери влаги неравномерно уменьшается объем образца и происходит раскрытие сомкнутых трещин.

Коэффициенты фильтрации монолитных образцов кембрийской глины исследовались в лабораторных условиях методом фильтрационной консолидации, а также прямой фильтрацией через образец при создании больших гидравлических градиентов (от 100 до 300). Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Результаты определения коэффициента фильтрации кембрийской глины

Таблица 1.

№ скв	Интервал опробования, м		По консолидации	Коэффициент фильтрации, м/сут		
	от	до	Коэффициент фильтрации, м/сут	вдоль	поперек	коэфф. анизотропии
1п	5,3	6,0	1E-06	1,40E-06	1,10E-07	12,7
	6,8	8,7	6,30E-07	5,40E-07	6,50E-08	8,3
	9,6	9,9	2,00E-06	1,60E-06	1,30E-07	12,3
6п	6,6	7	5,00E-06	1,60E-06	1,90E-07	8,4
	7,9	8,3	1,60E-06	1,00E-06	9,20E-08	10,9
	9,2	9,6	4,00E-06	6,60E-07	7,40E-08	8,9
8п	5,7	6	2,50E-06	8,40E-07	9,50E-08	8,8
	7,9	8,3	1,60E-07	1,20E-06	1,10E-07	10,9
	9,3	9,7	2,50E-06	5,20E-07	8,80E-08	5,9
12п	5,1	7,5	6,30E-07	8,00E-08	1,30E-08	6,2
	7,3	7,8	6,30E-06	8,40E-07	7,30E-08	11,5
	9,1	9,6	2,00E-06	3,20E-07	3,40E-08	9,4

Из таблицы видно, что коэффициент фильтрации кембрийских глин варьирует в диапазоне от $n \cdot 10^{-6}$ до $n \cdot 10^{-8}$ м/сут. Определения методом фильтрационной консолидации хорошо согласуются с коэффициентом фильтрации, полученным при фильтрации прямым способом в плоскости напластования (горизонтальной плоскости). Песчаные прослои и вкрапления в глину являются причиной фильтрационной анизотропии. Лабораторные эксперименты показали, что коэффициент фильтрации поперек напластования (вертикально) в среднем в 9,5 раз ниже, чем вдоль напластования (горизонтально).

Проведенные лабораторные исследования свидетельствуют о том, что опробуемые монолиты обладают крайне низкими коэффициентами фильтрации. Однако, известно, что лабораторные исследования не учитывают масштабный эффект и могут занижать реальные значения параметров. Это особенно актуально в условиях трещиновато-блочной среды. По этой причине для изучения поведения трещиноватой системы кембрийских глин в естественных условиях (*in situ*) были проведены поинтервальные нагнетания.

Нагнетания проводились в четырех скважинах, расположенных по периметру полигона. В каждой скважине нагнетания проводились в трех интервалах: первый интервал оборудован на верхний слой дислоцированных глин, второй и третий – на монолитные (Рис. 4). Для этого гидрогеологическая скважина поэтапно разбуривалась на глубину 6, 8 и 10 м. Чтобы предотвратить влияние четвертичных песков и суглинков на ход эксперимента, скважина была оборудована кондуктометром до кровли дислоцированных глин. Завершив проходку скважины до необходимой глубины, в ее ствол погружался пакер, и изолировал ствол таким образом, чтобы мощность опробуемого интервала составляла 1 м (5–6 м, 7–8 м, 9–10 м).

Опытные нагнетания проводились по методике Люжона [9, 10]. Она подразумевает ступенчатое увеличение давления, с которым вода подается в опробуемый интервал, а затем ступенчатое снижение давлений. Такой подход позволяет не только определить коэффициент фильтрации среды, но и изучить геомеханическое поведение трещиноватой системы.

Результаты испытаний приведены на Рис. 5. Из них видно, что на начальных этапах при небольших давлениях поглощения воды в опробуемый интервал не происходит. Чувствительности измерительных приборов не хватает, чтобы рассчитать коэффициент фильтрации. Можно лишь оценить, что коэффициент фильтрации составляет менее $1E-4$ м/сут. По мере увеличения давления ситуация не меняется. Однако при достижении определенного давления происходит раскрытие трещин и начинается поглощение воды в опробуемом интервале. Давление раскрытия трещин за-

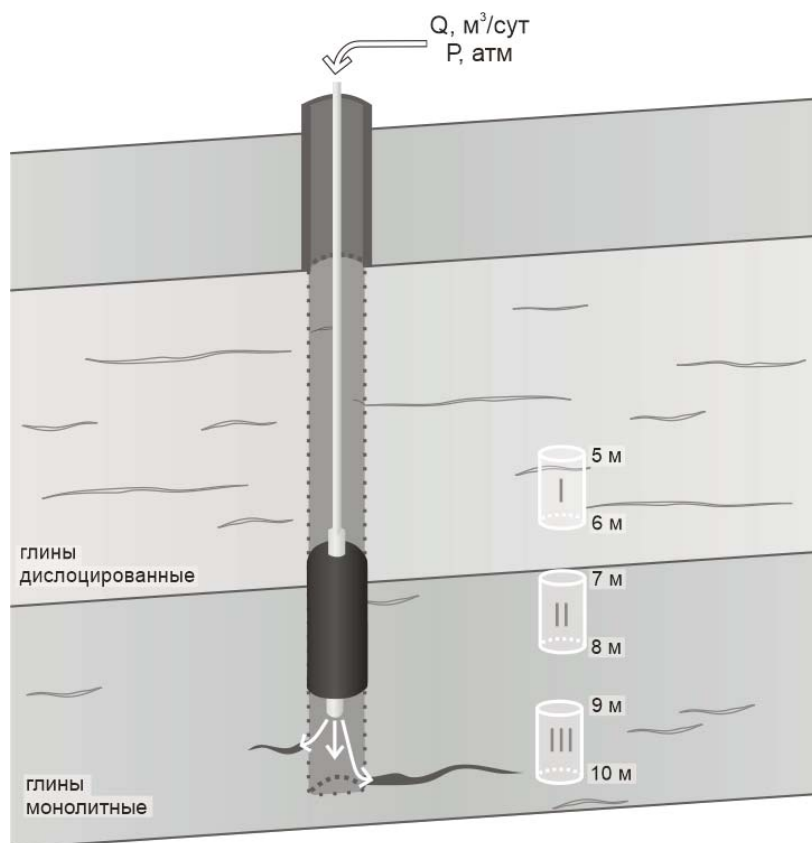


Рис. 4. Схема нагнетательных испытаний в зоне дислоцированных и монолитных глин.

висит от глубины опробования и в среднем составляет для кембрийских глин 4 литостатических давления. При максимальных приложенных давлениях коэффициент фильтрации трещин варьирует от 0,1 до 0,5 м/сут.

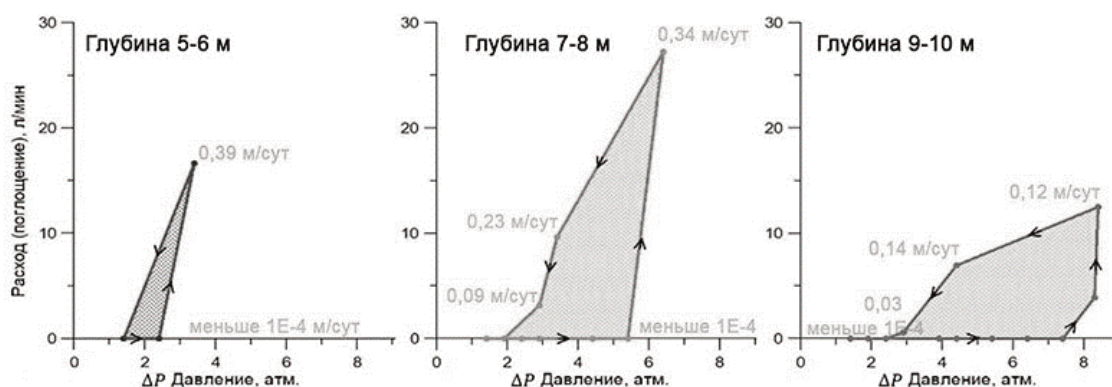


Рис. 5. Гистерезис кривых роста и снижения давлений.

При обратном снижении ступеней давлений в поведении трещиноватой системы наблюдается гистерезис. Трещины смыкаются обратно при значительно меньших давлениях, в сравнении с теми, которые необходимо создать для их раскрытия. Это свидетельствует о пластичных деформациях в глине в момент раскрытия трещин.

Необходимо отметить, что несмотря на гистерезис, во всех опробуемых интервалах при снижении давления нагнетания после гидроразрыва происходило смыкание трещин, т.е. среда вновь становилась непроницаемой.

Подводя итог исследованиям фильтрационной неоднородности кембрийских глин в районе полигона токсичных отходов Красный Бор, отметим следующие пункты:

- толща кембрийских глин является блочной средой;
- в естественных условиях залегания трещины находятся в сомкнутом состоянии и не фильтруют воду. В естественном сложении коэффициент фильтрации кембрийских глин не превышает значений $n \cdot 10^{-6}$ м/сут;
- для кембрийских глин характерна фильтрационная анизотропия. Коэффициент фильтрации по горизонтали в среднем в 9,5 раз выше, чем по вертикали;
- за счет своих пластичных характеристик и возможности набухать кембрийская глина обладает способностью к самозалечиванию трещин;
- при снятии литостатического давления с массива глин, например при проходке выработок, а также за счет уменьшения влажности (высыхания) происходит раскрытие систем трещин. Коэффициент фильтрации по трещинам может достигать 0,5 м/сут;
- изменение фильтрационных свойств кембрийских глин в зависимости от действия внешних условий должно учитываться при проектировании и строительстве траншеи под противофильтрационной завесой.

Литература

1. Дашко Р.Э., Еремеева А.А. Анализ и оценка повышения безопасности захоронения низкоактивных отходов в нижнекембрийских синих глинах западной части Ленинградской области // *Записки Горного института*. Т.154. 2004. С. 131–135.
2. Дашко Р.Э., Коробко А.А. Геотехнические аспекты исследований нижнекембрийских глин Санкт-Петербурга как основания сооружений // *Жилищное строительство*. 2014. №9. С. 19–22.
3. Еремеева, А. А. Инженерно-геологическая и геоэкологическая оценка условий захоронения промышленных отходов в нижнекембрийских глинах Ленинградской области: дисс. канд. геол.-минералогич. наук: 25.00.08/ Еремеева Анастасия Александровна. - СПб., 2002 г. – 212 с.
4. Коробко А.А. Инженерно-геологический анализ и оценка условий строительства и эксплуатации сооружений различного назначения в пределах Предглинтовой низменности (Санкт-Петербургский регион). Автореферат. Санкт-Петербург. 2015 г.
5. Румынин В.Г., Никуленков А.М, Зональность физических свойств котлинских глин вендской системы (северо-запад русской платформы) // *Записки Горного института*. 2012
6. Румынин В.Г., Панкина Е.Б., Якушев М.Ф. и др. Оценка влияния атомно-промышленного комплекса на подземные воды и смежные природные объекты. СПб.: Изд-вос.-Петерб. ун-та., 2002 г., 246 с.
7. Часовникова Е.В. Исследование изменений состава и свойств кембрийских глин при их взаимодействии с жидкими промхимотходами на опытном полигоне «Красный Бор» с целью прогноза охраны окружающей среды. Промежуточный отчет, 1978 г.
8. Blumling P., Bernier F., Lebon P., Derek Martin C., *The excavation damaged zone in clay formations time-dependent behaviour and influence on performance assessment* doi: 10.1016/j.pce.2006.04.034, 2006
9. Houlby, A. C. Routine interpretation of the Lugeon water-test// *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 9(4), doi: 10.1144/GSL.QJEG.1976.009.04.03, 1976, p. 303–313.
10. Lugeon, M. Barrages et géologie. *Bulletin Technique de La Suisse Romande*, 58, 1932

ПАЛЕОДОЛИНА КАК ОСЛОЖНЯЮЩИЙ ФАКТОР ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЛАЭС-2

В.А. Ерзова^{1,2}, Ю.П. Стародубова¹, О.И. Новицкая³, В.Г. Румынин^{1,4},
А.М. Никуленков^{1,4}

¹Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Средний пр., 41, Санкт-Петербург, 199004 Россия. E-mail^ erzova@hgepro.ru

²Санкт-Петербургский горный университет, 21 Линия, 2, Санкт-Петербург, 199121 Россия

³Санкт-Петербургский филиал АО Атомэнергопроект, ул. Савушкина, 82,
Санкт-Петербург, 197183 Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7–9,
Санкт-Петербург, 199034 Россия

Одним из критериев повышения качества проектирования сооружений является достаточность результатов инженерно-геологических изысканий. При строительстве сооружений возникает необходимость изучения местности для последующего предотвращения техногенных рисков. На территории строительства Ленинградской АЭС-2 (ЛАЭС-2) такие риски возникли при обнаружении древнего эрозионного палеовреза в северо-восточной и восточной частях площадки строительства 1-й очереди, что в конечном итоге привело к увеличению категории сложности инженерно-геологических условий (до III - сложной) и появлению осложняющих проектирование и строительство факторов.

Строительство ЛАЭС-1 на берегу Копорской губы Финского залива начато в 1967 г., ввод в эксплуатацию осуществлён в 1973 г. (Рис. 1). С 1987 г. начаты работы на площадке предполагаемого строительства ЛАЭС-2, расположенной на расстоянии около 1 км от ЛАЭС-1 и 2 км от береговой линии [1].

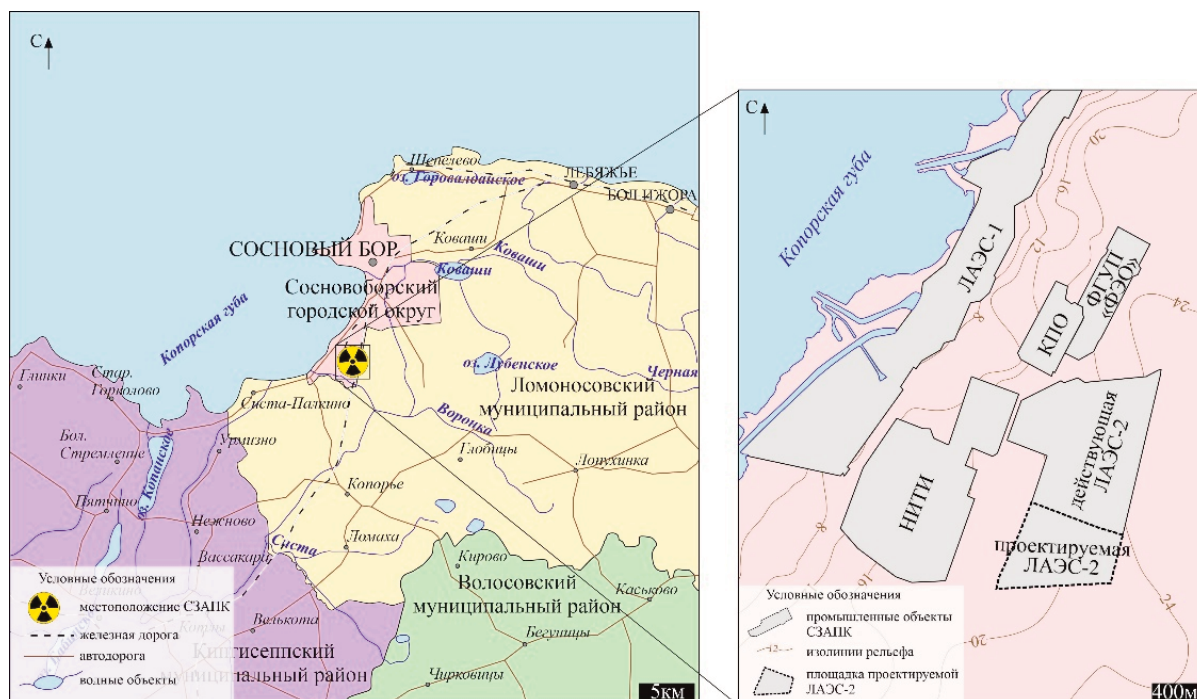


Рис. 1. Расположение проектируемой ЛАЭС-2.

Впервые древние эрозионные врезы долинного типа с крутыми бортами, заполненными четвертичными отложениями, в районе площадок строительства 1-й и 2-й очереди Ленинградской АЭС-2 были обнаружены в 2006–2007 гг. единичными скважинами. Тогда, для предварительного оконтуривания палеодолины был проведён анализ результатов бурения дополнительно по соседним площадкам и между ними, выполнена электроразведка методом ВЭЗ.

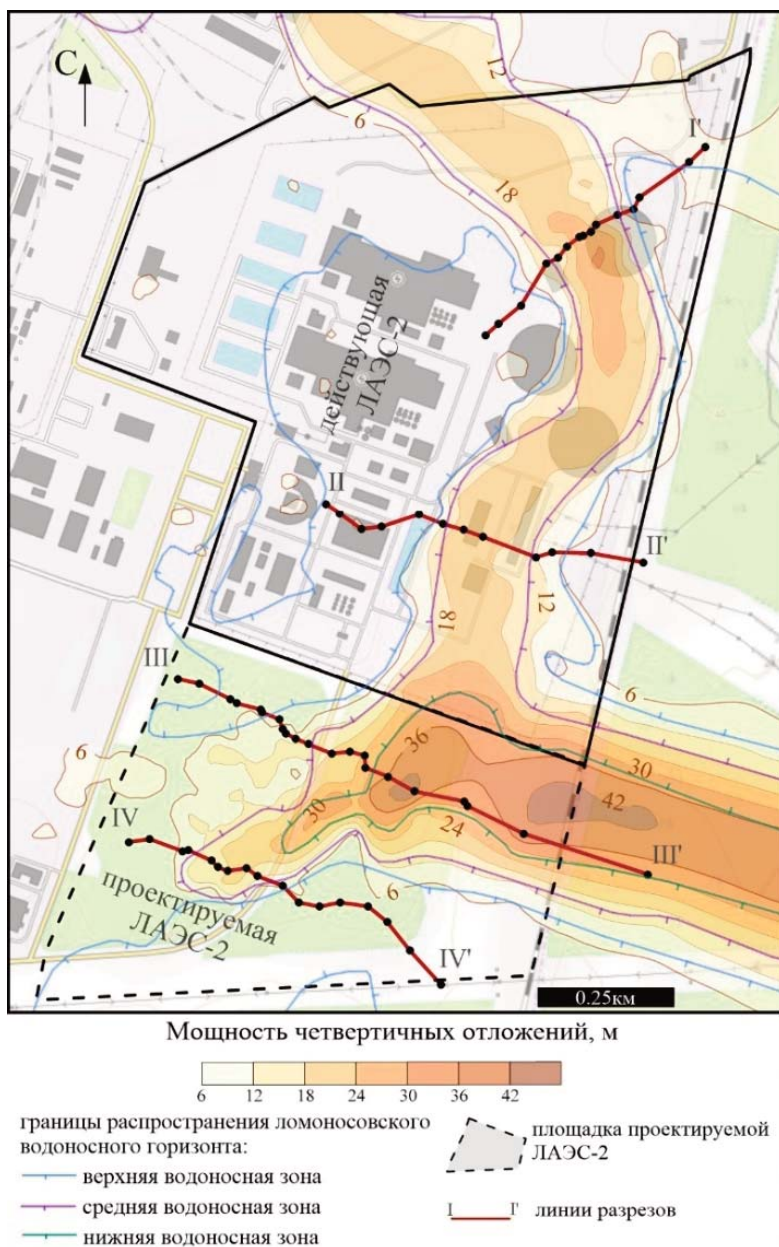


Рис. 2. Карта расположения палеодолины.

По мере изучения разреза четвертичных отложений, менялись представления о контурах и строении палеодолины. Всего за период с 1987 г. по 2021 г. различными организациями было пройдено более 1500 скважин, выполнены геофизические исследования, в том числе и методом ВЭЗ, геофизические каротажные исследования и т.д. На настоящий момент полностью не решен вопрос о глубине палеовреза в районе восточной границы площадки - скважины, вскрывшие его на полную мощность в самой глубокой части, отсутствуют. Форма и расположение древних палеорусел в районе ЛАЭС-2 в соответствии с современными представлениями приведены на рис. 2. Картирование палеорусел выполнено при помощи трехмерного геологического моделирования на основании всего объема инженерно-геологической информации, накопленной за годы исследований. Изученность палеодолины с точки зрения её внутреннего строения всё ещё остается недостаточной в силу большой неоднородности и отсутствия явных на настоящий момент закономерностей распространения отдельных литологических разностей.

В ходе инженерных изысканий на территории площадки ЛАЭС-2 в разрезе четвертичных отложений выделено 24 инженерно-геологических элемента. Литологический состав отложений, заполняющих тело палеодолины, включает в себя гравийные отложения, пески различной крупности, супеси, суглинки и глины флювиогляциального (водно-ледникового), гляциального (ледникового) и лимногляциального (озерно-ледникового) генезиса. Для грунтов отдельных инже-



Рис. 3. Осложнения при строительстве (котлован насосной).



Рис. 4. Осложнения при строительстве (котлован электрохозяйства).

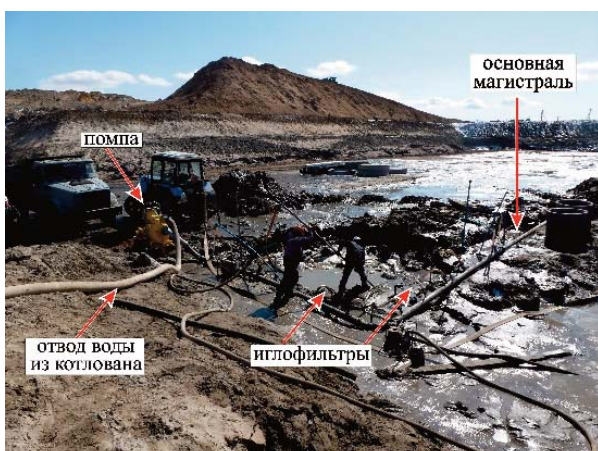


Рис. 5. Двухъярусное (по глубине) размещение иглофильтров.

нерно-геологических элементов были проведены специальные исследования по определению прочностных, деформационных (статических и динамических) и фильтриционно-суффозионных характеристик.

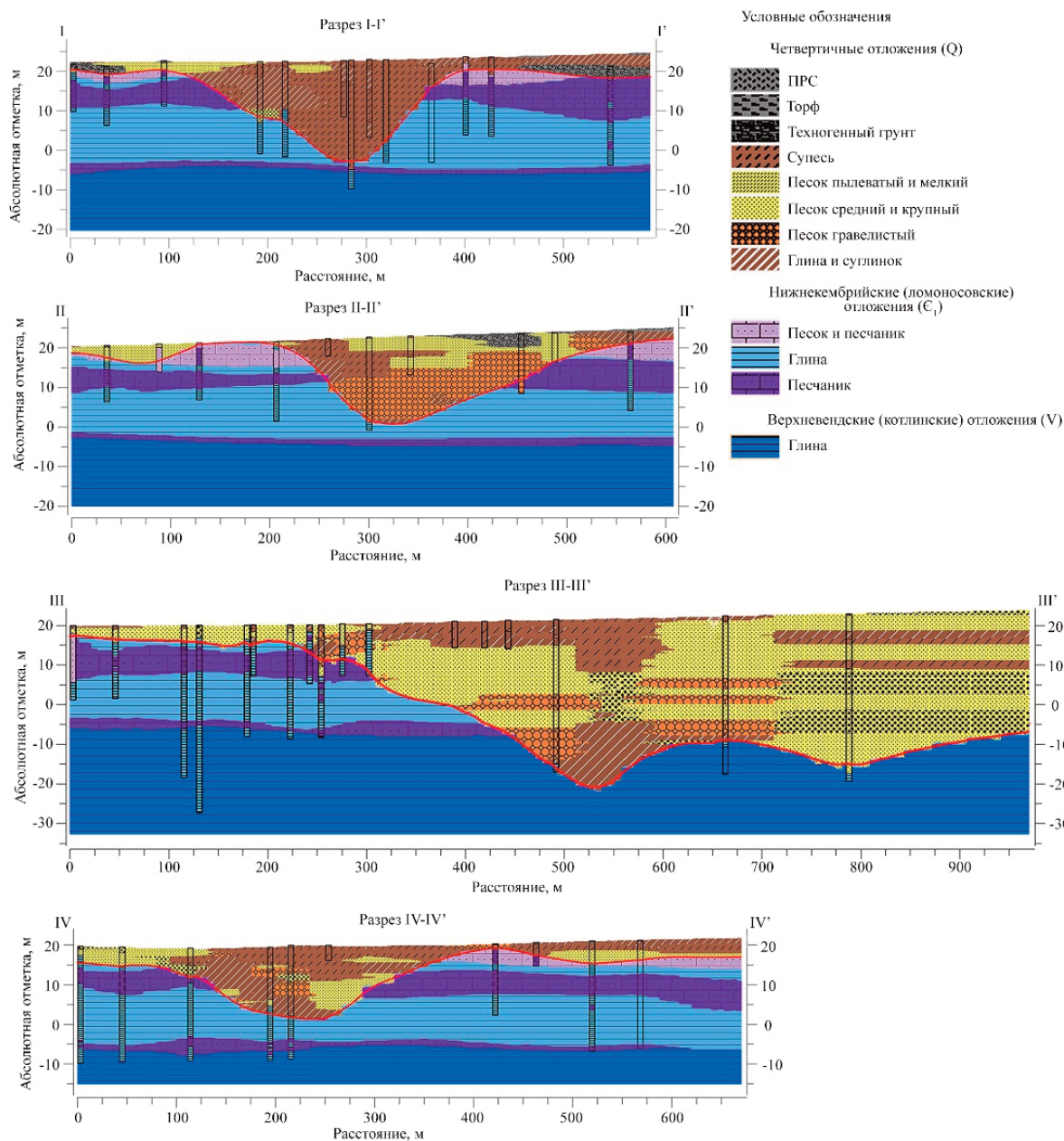


Рис. 6. Геологические разрезы поперек палеодолины, пересекающей первую и вторую очереди ЛАЭС-2.

Наибольшее влияние на принятие проектных решений, с точки зрения инженерно-геологических условий, оказывает наличие в разрезе четвертичных отложений участков развития суффозионно-неустойчивых (пески флювиогляциальные средней крупности, пески гравелистые, гравийные отложений) и потенциально разжижаемых грунтов (супесь текучая, пески мелкие и пылеватые гляциальные и лимногляциальные).

В процессе строительства 1-й очереди ЛАЭС-2 наличие в отложениях палеодолины суффозионно-неустойчивых и склонных к оплыванию грунтов привело к нарушению устойчивости откосов котлованов под здания насосной станции одной из градирен и здания электрохозяйства (Рис. 3, 4).

Оптимального водопонижения удалось достигнуть только при помощи двухъярусной иглофильтровой установки с размещением по внутреннему контуру котлована (Рис. 5). Верхний ярус иглофильтров длиной 3,5 м был смонтирован на залегающие в бортах и в основании котлована супеси, нижний - глубиной 6 м – на подстилающие гравелистые пески. Кольцевой и пластовый дренажи были успешно оборудованы внутри водопонижающего кольца.

В рамках выполнения инженерных изысканий в 2021 г. для решения, в том числе, и инженерно-геологических задач СПбО ИГЭ РАН построена высокодискретная литофациальная модель всей территории Северо-Западного атомно-промышленного комплекса, включая территорию ЛАЭС-2. Это

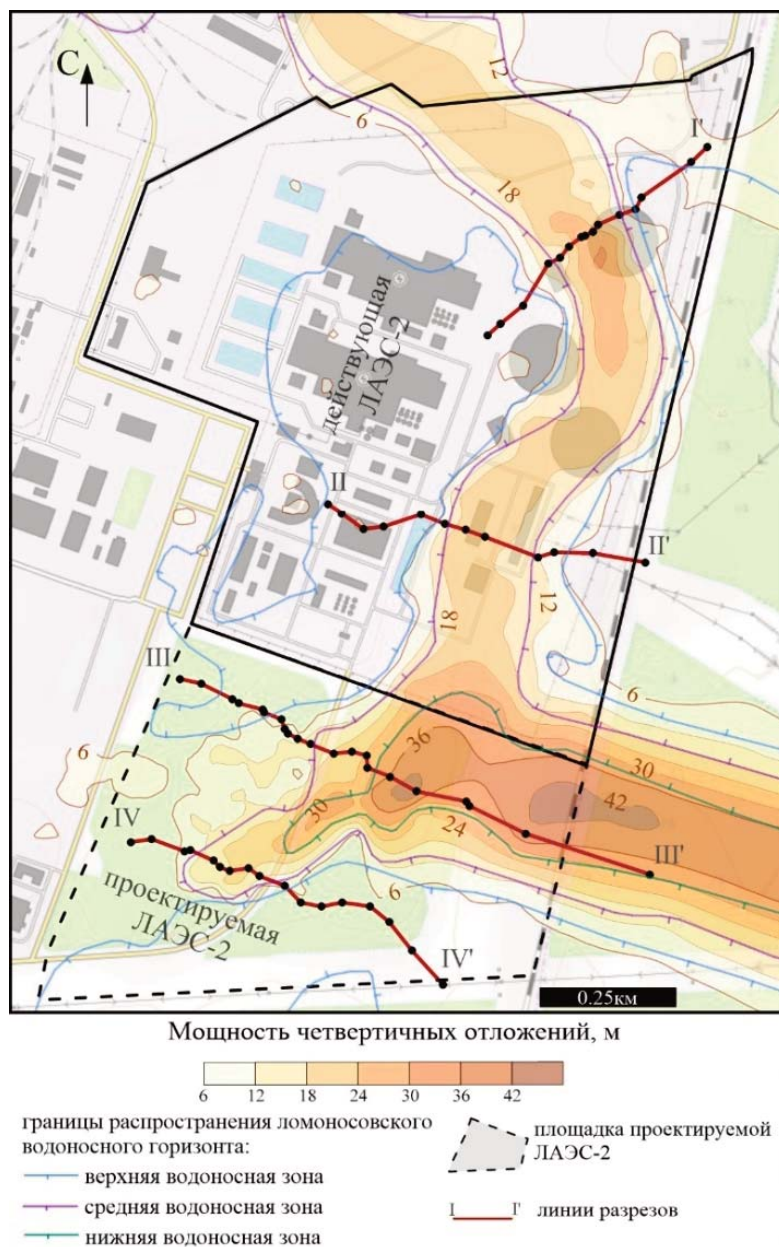


Рис. 7. Распространение суффозионно-неустойчивых грунтов на площадке строительства 2 очереди ЛАЭС-2.

позволило получить целостное представление о внутреннем строении четвертичных отложений в контурах древних эрозионных врезов этой территории и областях распространения отдельных литологических разностей, представляющих наибольший интерес с точки зрения принятия проектных решений.

Прямое практическое применение такого рода моделей в инженерно-геологических целях, на примере настоящего объекта, сводится к возможности построения разрезов по произвольной линии и различных карт изолиний всех структурных слоев модели.

Полученные разрезы (Рис. 6) показывают, что на севере территории 1-й очереди ЛАЭС-2 палеодолина заполнена преимущественно супесями и суглинками (разрез I-I'), по мере продвижения в южном направлении в разрезе преобладают пески от пылеватых до гравелистых (разрез II-II' и III-III'). В юго-западной части площадки 2-ой очереди ЛАЭС-2 встречаются как слабопроницаемые (супеся и суглинки), так и проницаемые (пески от пылеватых до гравелистых) породы. Мощность четвертичных отложений, заполняющих русло палеодолин, изменяется от 20 м на территории 1 и 2 энергоблоков ЛАЭС-2 и достигает максимума в 40 м в пределах проектируемой площадки энергоблоков 3 и 4.

Полученные на модели слои отдельных инженерно-геологических элементов, позволили выделить суммарную мощность распространения суффозионно-неустойчивых грунтов (Рис. 7) и визуализировать в плане области наибольшей суффозионной опасности.

В ходе проектирования работ по организации строительства 2-й очереди ЛАЭС-2 для обеспечения безопасности рассматриваются такие типы водозащитных мероприятий как: «стена в грунте» и шпунтовое ограждение котлована. Основанием для проектирования подобных сооружений является распространение в наиболее погруженной части палеодолины крупных и гравелистых песков с высокими (до 10 м/сут и более) коэффициентами фильтрации, что может привести к поступлению значительных объемов воды в выработки, а в пределах бортов проектируемых котлованов ожидается развитие суффозионных процессов (Рис. 7). Эффективность этих решений будет оцениваться методом численного моделирования геофильтрации на базе литофациальной модели площадки.

В настоящее время на площадке строительства наличие древнего палеовреза, несмотря на опыт строительства и эксплуатации 1-й очереди ЛАЭС-2, значительно усложняет процесс проектирования организации строительства объектов с фундаментами глубокого заложения, и приводит к удорожанию строительства. Численное моделирование геофильтрации, основанное на качественных изысканиях, помогает оптимизировать защитные мероприятия, связанные с негативным влиянием на строительство подземных вод четвертичного водоносного горизонта.

Таким образом, при наличии осложняющих факторов в геологическом строении территории строительства объекта, качественное проведение инженерно-геологических изысканий на этапе проектирования приведет к принятию решений, которые помогут снизить геотехнические риски при строительстве и дальнейшей эксплуатации.

Литература

- 1. Румынин В.Г., Панкина Е.Б., Якушев М.Ф., Боронина А.В., Кузнецова Е.Л., Кукушкина Т.А., Хархордин И.Л., Потапов А.А., Токарев И.В., Коносовский П.К., Абрамов В.Ю., Епимахов В.Н., Переверзева С.А., Харьковский К.С. Оценка влияния атомно-промышленного комплекса на подземные воды и смежные природные объекты (г. Сосновый Бор Ленинградской области). СПб.: Изд-во СПбУ, 2002. 249 с.*

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И СТРОЕНИЯ ЛЁССОВЫХ ТОЛЩ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА

О.В. Зеркаль, Е.Н. Самарин, И.П. Гвоздева

Геологический факультет, Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, МГУ. E-mail: igzov@mail.ru

Изучение лёссовых толщ южной части Восточно-Европейской платформы, включая Северное Причерноморье, а также прилегающих регионов – области юго-восточного обрамления Карпат и нижней части долины Дуная, Северном Предкавказье, проводится уже более ста лет. Результаты этих исследований были обобщены в ряде монографий [1, 3, 7], а также нашли отражение при составлении серии карт распространения лёссовых пород [2, 6, 10]. Однако, до последнего времени считалось, что лёссовые толщи встречаются только лишь в северной, степной части Крыма (Рис. 1). Вместе с тем, авторами работы на южном склоне Главного хребта Крымских гор был описан ряд разрезов, преимущественно приуроченных к цоколям надпойменных террас низких уровней, где обнажаются типичные образования лёссово-почвенной формации, характеризующиеся просадочностью и содержащие горизонты палеопочв [5]. В настоящей работе представлены данные об отложениях лёссово-почвенной формации южного склона Крымских гор.

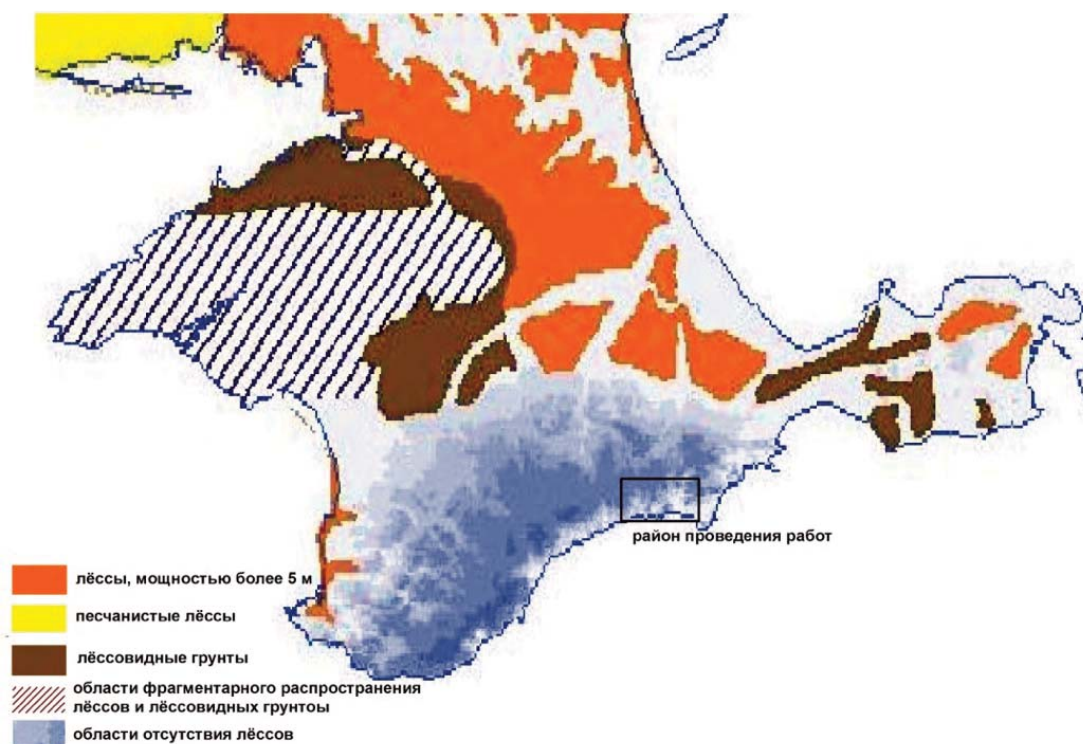


Рис. 1. Фрагмент Карты распространения лёссов на территории Европы (приведено по D.Haase [10] с изменениями).

Особенности геолого-геоморфологических условий юго-восточной части южного склона Крымских гор. Рассматриваемая территория является зоной перехода от центральной части Крымских гор с отметками водоразделов в 800-900 м, южный макросклон которой представлен возвышенной эрозионно расчлененной равниной, полого спускающейся к Черному морю, к восточному сектору Крымских гор, для которого характерны существенно более низкие отметки водораздельной части главной гряды: 500-750 м. Для этого района характерно наличие кулисообразно ориентированных прибрежных гряд с высотами от 350 м до более 570 м, отделенных от главной гряды диагонально ориентированными долинами. Ширина южного макросклона Крымских гор на рассматриваемой части побережья составляет 6-8 км.

Коренные отложения представлены в пределах южного макросклона восточного фланга центральной части Крымских гор терригенными триас-нижнеюрскими образованиями флишевой формации, а восточнее - средне-верхнеюрскими образованиями, слагаемыми конгломератами, песчаниками с прослоями известняков, а также – алевритистыми глинами. Таким образом, изученный район по своим геолого-геоморфологическим и структурно-тектоническим условиям в определенной мере отличается от условий, характерных для западной и центральной частей южного берега Крыма (ЮБК).

История геологического развития рассматриваемой территории в четвертичное время достаточно сложна, она включает чередование периодов регрессий (с отметками уровня моря от минус 10-20 м до минус 70-90 м и более), совпадавших с оледенениями, и периодов трансгрессий (с отметками уровня моря от +5-10 м до +40-60 м) в эпохи межледниковий, происходивших на фоне общего неотектонического воздымания [4]. В результате этого распространение и строение четвертичных отложений характеризуется существенной сложностью – наличием эрозионных останцов с различными высотными отметками, толщами, вложенными в переуглубления и перекрытыми более молодыми образованиями, также испытывавшими впоследствии размыв при понижении базиса эрозии.

Лёссовые толщи южного склона Крымских гор. К образованиям лёссово-почвенной формации в рамках проводившихся исследований относились пылеватые отложения преимущественно суглинистого состава, палевого (различных оттенков) цвета, зачастую макропористые, обладающие просадочностью, и содержащие горизонты палеопочв. Нередко в обнажениях для таких отложений характерна столбчатая отдельность. Особенностью лёссов ЮБК является их обогащенность мелкодресвяным материалом (до 1-3%), представленным кварцем или алевропесчаниками. На рассматриваемой территории было описано несколько разрезов, слагаемых или включавших образования, для которых были типичны вышеприведенные характеристики (Рис. 2).



Рис. 2. Местоположение описанных разрезов.

Разрезы: 1 – Арпат, 2 – Ай-Серез, 3 – Дачное (останец), 4 – Гультерез, 5 – Шелен, 6 – Судак-гаражи, 7 – Судак-вышки-1, 8 – Судак-вышки-2, 9 – Веселое-1, 10 – Веселое-2.

В целом, описанные разрезы, включающие лёссы и лёссовидные отложения или слагаемые ими, в пределах изученной территории могут быть разделены на два типа. Первый тип (группу) образуют разрезы (Гультерез, Шелен, Судак-вышки-1 и Судак-вышки-2, Веселое-2), где наблюдается классический разрез лёссово-почвенной формации, представляющей собой чередование

горизонтов лёссов и палеопочв различной степени развитости. Цикличность строения образований лёссово-почвенной формации связывается с цикличности климата - чередованием теплых и холодных эпох. Формирование палеопочвенных горизонтов соотносится с более теплыми и гумидными условиями, а горизонтов лёссов - с более холодными и более аридными. Второй тип (группу) формируют разрезы (Арпат, Ай-Серез, Дачное (останец), Судак-гаражи, Веселое-1), где также прослеживается цикличность строения, но вместо палеопочвенных горизонтов лёссовые прослои разделены горизонтами галечников и валунно-галечников аллювиально-пролювиального генезиса. Очевидно, что накопление валунно-галечных толщ также может сопоставляться с периодами теплого и гумидного климата, для которого была характерна повышенная водность поверхностного стока. При этом, разрезы второй группы располагаются, как правило, в бортах долин рек, вблизи их выхода на возвышенную предгорную равнину, т.е. в районах развития пролювиальных шлейфов и конусов выноса.

Наиболее полно описаны разрезы в правом борту в верховьях долины р. Арпат (разрез Арпат), на южной окраине д. Зеленогорье, и в левом борту долины р. Суук-Су (г. Судак), в 900 м к юго-востоку от развилки Феодосийского и Восточного шоссе.

Описанный в левом борту р. Суук-Су (г. Судак) разрез IV надпойменной террасы, имеющий эрозионный характер, относится к разрезам первого типа (разрез «Судак-вышки») и характеризуется последовательным чередованием горизонтов суглинков палевых, пылеватых, макропористых, с неявной столбчатой отдельностью, с включением от 2-3% до 5% дресвы и мелкого щебня алевролитов и песчаников, обычно хаотично ориентированного, и горизонтов суглинков от коричневатопалевых, коричневых до красновато-коричневых, с включением до 5% (реже более) дресвы и мелкого щебня алевролитов и песчаников. Такое строение разреза является характерным для «классических» разрезов лёссово-почвенной формации. Вместе с тем, в нижней части разреза отмечаются маломощные (0,2-0,3 м) прослои мелкой гальки с супесчано-суглинистым светло-палевым заполнителем. Общая мощность образований лёссово-почвенной формации составляет 13,4 м. Описанные отложения подстилаются среднеюрскими образованиями - глинами алевритистыми, светло-коричневыми, плотными, карбонатными.

Изучение гранулометрического состава грунтов, слагающих разрез «Судак-вышки», показало, что большинство горизонтов, отнесенных при макроописании к лёссами, слагаются лёссами среднесуглинистыми крупнопылевато-тонкопесчанистыми (здесь и далее используется классификация С.С.Морозова [8]). Вместе с тем, горизонты, отнесенные при макроописании к палеопочвам, представлены тяжелыми лёссовидными суглинками. Исключением явился только маломощный горизонт слоя 10, описанного как лёссовый, залегающий между сближенными горизонтами палеопочв, являющийся по своему гранулометрическому составу тяжелым лёссовидным суглинком.

Сходная изменчивость гранулометрического состава грунтов, в виде переслаивания среднесуглинистых крупнопылевато-тонкопесчанистых лёссов с горизонтами палеопочв, слагаемых тяжелыми лёссовидными суглинками, также была получена и для разреза «Шелен».

Для минерального состава лёссов (определения В.Л.Косорукова, МГУ) в разрезах первого типа (изучался для разреза «Шелен») характерно преобладание кварца, КППШ и плагиоклазов, доля которых суммарно достигает 49-55%. Доля глинистых минералов изменяется от 27% до 40%. Среди глинистых минералов ведущая роль принадлежит гидрослюдам и смешанослойным минералам (гидрослюда-сметтитового ряда), доля которых среди глинистых минералов составляет от 52% до 70%. Также в составе глинистых минералов значительно содержание хлорита (10-16%, в отдельных образцах возрастая до 22%) и каолинита (12-29%, в отдельных образцах снижаясь до 7-9%) при практически полном отсутствии собственно смектита. Суммарное содержание карбонатов в минеральном составе лёссов рассматриваемого разреза составляет от 9% до 16% и более. В горизонтах палеопочв в минеральном составе грунтов отмечается снижение доли кварца, КППШ и плагиоклазов, суммарное содержание которых составляет 43-48%. При этом доля глинистых минералов возрастает до 40-60%. Среди глинистых минералов в горизонтах палеопочв также ведущая роль принадлежит гидрослюдам и смешанослойным минералам (гидрослюда-сметтитового ряда), доля которых среди глинистых минералов изменяется от 58% до 82%. В отличие от лёссов, в составе глинистых минералов горизонтов палеопочв возрастает доля каолинита (до 20-25%) при некотором снижении доли хлорита при практически полном отсутствии собственно смектита. Суммарное содержание карбонатов в минеральном составе горизонтов палеопочв рассматриваемого разреза составляет 11-12%.

Для сближенных горизонтов палеопочв в средней части описываемого разреза отмечается загипсованность (содержание гипса до 4%).

Строение III надпойменной террасы в долине р. Арпат, где был описан разрез второго типа (разрез «Арпат»), характеризуется четким трехчленным строением. Верхняя пачка (слои 2-6), мощностью до 4,5 м, сложена отложениями делювиально-пролювиальными генезиса. Селевая составляющая здесь представлена достаточно мощными – 0,8-1,4 м – слабо окатанными валунно-галечниками пелитоморфных известняков и алевропесчаников с небольшим (15-20%) количеством алевритового заполнителя, разделенных относительно маломощными – 0,3-0,4 м – прослоями делювия, сложенными преимущественно легкими суглинками, коричневато-палевого цвета, облессованными, маловлажными. Ниже, по резкой волнистой границе, выделяется средняя часть разреза (слои 7-13), сформированная толщей лёссовидных отложений мощностью до 2,9-3,0 м, в основании которых располагаются аллювиально-пролювиальные отложения мощностью до 7,5 м. В целом, для лёссовидной части разреза характерна столбчатая отдельность, типичная для отложений, обогащённых карбонатным материалом. Наконец, основание разреза (слои 14-16) выполнено также двухчленной пачкой мощностью до 4,5-4,6 м, верхняя часть которой представлена (возможно эродированными) лёссовидными образованиями мощностью до 1,5 м, а нижняя часть формируется аллювиально-пролювиально-делювиальными образованиями, обогащёнными обломочным материалом.

Изучение гранулометрического состава грунтов, слагающих разрез «Арпат», показало, что горизонты в средней части разреза, отнесенные при макроописании к лёссовидным, слагаются, согласно классификации С.С.Морозова [8], тяжелыми лёссовидными суглинками, в то время как в нижней пачке лёссовидные грунты представлены средними лёссовидными суглинками. Несколько иная изменчивость гранулометрического состава грунтов была получена для разреза «Ай-Серез», где в средней части разреза залегает лёсс среднесуглинистый крупнопылевато-тонкопесчаный, а в нижней части лёссовидные отложения представлены средними лёссовидными суглинками.

Для минерального состава лёссовидных грунтов (определения В.Л.Косорукова, МГУ) в разрезах второго типа (изучался для разреза «Арпат») характерно преобладание кварца, КППШ и плагиоклазов, доля которых суммарно достигает 47-52%. Доля глинистых минералов также высока и составляет от 35% до 45%. Среди глинистых минералов ведущая роль принадлежит гидрослюдам и смешанослойным минералам (гидрослюда-сметкитового ряда), доля которых среди глинистых минералов составляет от 75% до 87%. Также в составе глинистых минералов значимо содержание хлорита (10-20%) при незначительном содержании каолинита (5-6%) и практически полном отсутствии собственно смектита. Суммарное содержание карбонатов в минеральном составе лёссовидных грунтов рассматриваемого разреза составляет от 6% до 11%.

Просадочность лёссов южного склона Крымских гор. Проведенное изучение просадочности лёссов ЮБК показало, что для этих грунтов характерен как первый, так и второй тип просадочности (таблица). При этом, просадочность второго типа более типична для горизонтов палеопочв и лёссов, чередующихся в разрезах с горизонтами валунно-галечников.

Оценка величин относительной просадочности лёссов ЮБК показала, что для рассматриваемой территории характерны грунты от слабопросадочных до чрезвычайно просадочных. Преобладающими являются среднепросадочные разновидности грунтов, относимые по своему гранулометрическому составу к среднесуглинистым крупнопылевато-тонкопесчаным лёссам.

Возраст лёссов южного склона Крымских гор. Выполненное определение возраста отложений лёссово-почвенной формации в изученных разрезах показало, что наиболее древними являются отложения, накопление которых относится к концу эоплейстоцена. Для образований в составе этих толщ характерна обратная намагниченность, сопоставляемая с эпохой Матуяма (определения Р.В.Веселовского, МГУ). Помимо этого, для палеопочвенных горизонтов этого временного интервала характерна красноцветность, типичная, как было показано при изучении лёссово-почвенных разрезов Западного Крыма, для палеопочв, формировавшихся в эоплейстоцене в условиях саваннных ландшафтов [1]. Основная часть описанных толщ лёссов на ЮБК, для которых характерна преимущественная прямая намагниченность, накапливалась в неоплейстоцене. Абсолютные датировки, выполненные методом ОСЛ для лёссов, залегающих в пределах правого борта долины р. Суук-Су (г. Судак) на IV геоморфологическом уровне, показали возраст в 30 ± 4 тыс. лет и 48 ± 10 тыс. лет (определение Лаборатории ОСЛ «ВСЕГЕИ»). Во второй точке палеомагнитные исследования также выявили в лёссово-почвенном разрезе наличие на фоне общей прямой намагниченности отложений

<i>Таблица.</i>					
Просадочность отложений лёссово-почвенной формации ЮБК					
Разрез	Слой	Относительная просадочность	Тип просадочности	Разновидность грунта по просадочности (по ГОСТ 25100)	Разновидность грунта (по классификации С.С.Морозова)
Шелен	5	0,044	I	среднепросадочный	лёсс среднесуглинистый крупнопылевато-тонкопесчанистый
	8	0,024	II	слабопросадочный	тяжелый лёссовидный суглинок
	13	0,037	I	среднепросадочный	лёсс среднесуглинистый крупнопылевато-тонкопесчанистый
Судак-гаражи	5	0,162	I	чрезвычайно просадочный	тяжелый лёссовидный суглинок
	9	0,037	II	среднепросадочный	лёсс среднесуглинистый крупнопылевато-тонкопесчанистый
Судак-вышки-1	5	0,054	I	среднепросадочный	лёсс среднесуглинистый крупнопылевато-тонкопесчанистый
	6	0,056	I	среднепросадочный	лёсс среднесуглинистый крупнопылевато-тонкопесчанистый
	7	0,041	II	среднепросадочный	тяжелый лёссовидный суглинок
Арпат	14	0,087	II	сильнопросадочный	средний лёссовидный суглинок
Ай Серез	5	0,113	II	сильнопросадочный	лёсс среднесуглинистый крупнопылевато-тонкопесчанистый
	13	0,146	I	чрезвычайно просадочный	средний лёссовидный суглинок

интервала обратной полярности (определения Р.В.Веселовского, МГУ), сопоставимого с экскурсом Лашамп (возраст 41-42 тыс. лет [9]).

Заключение. При выполнении среднемасштабных геолого-съёмочных работ были получены данные о развитии лёссов на южном склоне Крымских гор, где ранее предполагалось отсутствие их развития.

На рассматриваемой территории ЮБК было выделено два типа разрезов слагаемых или включающих лёссы и лёссовидные грунты. Первый тип (группу) образуют разрезы, где наблюдается классический разрез лёссово-почвенной формации, представляющей собой чередование горизонтов лёссов и палеопочв различной степени развитости. Второй тип (группу) формируют разрезы, для которых также характерна цикличность строения, но вместо палеопочвенных горизонтов прослои лёссовидных грунтов разделены горизонтами галечников и валунно-галечников аллювиально-пролювиального генезиса.

Изучение на территории ЮБК разрезов, слагаемых или включающих лёссы и лёссовидные грунты, показало, что эти грунты по времени накопления и показателям просадочности в значительной мере сопоставимы с лёссовыми толщами степной части Крыма и Предкавказья.

Литература

1. Веклич М.Ф. Палеозтапність і стратотипи ґрунтових формацій верхнього кайнозоя. - Київ: Наук. думка, 1982. 208 с.

2. Галай Б.Ф., Сербин В.В., Плахтюкова В.С., Галай О.Б. Лёссовые грунты Северного Кавказа и Крыма (сравнительный анализ)//Наука. Инновации. Технологии. 2017. №2, с. 97-108
3. Геология лёсса и лессовидных пород в СССР. – М., 1989, 170 с.
4. Зеркаль О.В., Габдуллин Р.Р., Самарин Е.Н. Современные проблемы четвертичной геологии центральной части Крымского полуострова. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2017. №3. С. 27-34
5. Зеркаль О.В., Самарин Е.Н., Гвоздева И.П. Лёссовые толщи южного берега Крыма. Первые данные//Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии: Тр. Междунар. научн. конф. (Москва, МГУ, 04.02.2021 г.)//Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королёва. – М.: ООО «Сам Полиграфист», 2021. – С. 245-250
6. Карта распространения и просадочности лёссовых пород СССР/под ред. Е.М.Сергеева. Масштаб 1:2500000. М., 1989
7. Лёссовый покров Земли и его свойства/В.Т.Трофимов, С.Д.Балыкова, Н.С.Болиховская и др. - М.: Изд-во МГУ, 2001. 464с.
8. Морозов С.С. Классификация лёссовых пород. Инженерно-геологические свойства горных пород и методы их изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1962. - С. 35-43
9. Cohen K.M., Gibbard P.L. Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years, version 2019 QI-500//Quaternary International. 2019. v. 500, pp. 20-31
10. Haase D., Fink J., Haase G., Ruske R., Pécsi M., Richter H., Altermann M., Jäger K.-D. Loess in Europe - its spatial distribution based on a European Loess Map, scale 1:2,500,000//Quaternary Science Reviews. 2007. v. 26 (9-10), pp. 1301-1312.

ОПЫТ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ПОД ВЭС НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТОВ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

И.В. Иванусь

Кубанский государственный университет, кафедра нефтяной геологии, гидрогеологии и геотехники.
г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149. E-mail: irunin@mail.ru

Ветропарки, как и атомные электростанции, – это часть большого государственного проекта по развитию низкоуглеродной энергетики, которая не будет вредить экологии. Это мировой тренд, который поддерживает и Россия. Технический потенциал ветроэнергетической отрасли в России на данный момент оценивается свыше 50 000 кВт•ч /год. Экономический же потенциал составляет примерно 260 млрд кВт•ч /год, что составляет практически треть от производства электроэнергии в России в целом. Поэтому на карте в разных регионах появляются целые комплексы ветроэнергетических станций – ветропарки. После возведения крупного ветропарка в Адыгее, вектор строительства сместился в Ставропольский край, который на 2018–2021 гг. стал ключевым регионом России для реализации таких проектов в ветроэнергетике.

Необходимо отметить, что климатические условия – самый значимый фактор при оценке потенциала региона. Однако не всегда наличие одних только благоприятных природных данных является залогом успешного развития ВИЭ в регионе. Немаловажную роль играют и инженерно-геологические условия. Место для размещения ВЭС должно соответствовать определенным требованиям. В том числе предъявляются они и к инженерно-геологическим условиям. Согласно [1], площадки для строительства ВЭС рекомендуется выбирать с учетом следующих условий:

- грунты, слагающие площадку, должны допускать строительство зданий и сооружений, а также установку соответствующего оборудования;

- уровень грунтовых вод должен быть ниже глубины заложения подвалов зданий и подземных инженерных коммуникаций;

- поверхность площадки должна быть относительно ровной с уклоном, обеспечивающим поверхностный водоотвод;

- площадка не должна располагаться в местах залегания полезных ископаемых или в зоне обрушения выработок, на закарстованных или оползневых участках и участках, загрязненных радиоактивными выбросами, а также в охранных зонах.

- при строительстве ВЭУ, ВЭС в районах распространения многолетнемерзлых грунтов следует учитывать возможные изменения физико-механических, теплофизических и фильтрационных свойств пород оснований и материалов сооружений при их переходе из мерзлого состояния в талое и наоборот.

- при строительстве ВЭУ, ВЭС на скальных грунтах необходимо учитывать структуру скального массива, его обводненность, газоносность и естественное напряженное состояние.

В качестве объекта изучения была выбрана территория Ипатовского городского округа Ставропольского края. В геоморфологическом отношении район работ приурочен к геоморфологической провинции Предкавказья, к области структурно-денудационных плато и эрозионно-аккумулятивных равнин Ставропольского поднятия. Участок изысканий расположен в пределах пластовой структурно-эрозионной высокой равнины, расчлененной пологими долинами притоков р. Калаус и балочной сетью. Коэффициент расчленённости территории равен 0,2–0,4. Согласно карты общего сейсмического районирования [2], район проведения работ относится к зоне с возможной сейсмической активностью 6 баллов.

Гидрогеологические условия участка работ сложные и характеризуются наличием нескольких горизонтов подземных вод. Питание подземных вод осуществляется преимущественно за счет атмосферных осадков. Разгрузка подземного потока осуществляется в местную речную и овражно-балочную сеть. Вблизи поверхностных водотоков и искусственных водоемов дополнительное питание подземные воды получают за счет фильтрации поверхностных вод при паводках. На участках, сложенных с поверхности плотными глинистыми грунтами с низкими фильтрационными свойствами в периоды повышенной инфильтрации возможно формирование горизонта подземных

вод типа «верховодки», а на пониженных участках рельефа – поверхностное водостояние. Водоносный горизонт в целом функционирует в безнапорном режиме. В толще подстилающих неогеновых отложений водоносные горизонты вскрыты на разных глубинах (от 6,4 м до 16,6 м) и приурочены в основном к кровле прослоев известняка-ракушечника, выветрелого до щебня и гравия, а также к прослоям мергеля, песка и гравия в толще темно-серых сарматских глин. Подземные воды водоносных горизонтов, перекрытых локальными водоупорами из плотных глинистых отложений, обладают местным напором.

Подземные воды всех водоносных горизонтов имеют повышенную минерализацию и оказывают агрессивное воздействие на бетонные и железобетонные конструкции по содержанию сульфатов, хлоридов и солей магния.

В пределах территории проведения изысканий выделено 11 инженерно-геологических элементов.

Грунты ИГЭ–1а относятся к дисперсным связным, элювиальным, образованы в результате биологического выветривания, органо-минеральные.

Грунты ИГЭ–2, ИГЭ–3, ИГЭ–5, ИГЭ–6 относятся к дисперсным связным, делювиальным, глинистым грунтам.

Грунты ИГЭ–8 и ИГЭ–9 представлены дисперсными несвязными песчаными грунтами.

Грунты ИГЭ–10 и ИГЭ–12 сложены сарматскими глинами.

Грунты ИГЭ–13 представлены известняками.

Типовая инженерно-геологическая колонка представлена на Рис. 1.

Специфические грунты представлены сарматскими глинами, обладающими набухающими свойствами и содержащими примеси органического вещества, а также глинами ИГЭ–11, содержащими примеси органического вещества.

Современные тектонические движения на периферийных участках Ставропольского поднятия имеют характер медленных опусканий, поэтому развития эрозионной сети здесь не происходит, а преобладают процессы аккумуляции. В связи со слабой расчлененностью рельефа и литологическим составом пород в пределах исследуемой территории не отмечается развития склоновых процессов: оползней, осыпей, обвалов. На участках с близким к поверхности залеганием уровня подземных вод развит процесс подтопления.

Участок работ по геолого-литологическим признакам относится к потенциально карстоопасной территории возможного развития карбонатного карста в труднорастворимых известняках сарматского яруса верхнего миоцена.

В процессе выполнения изысканий тектонически-разрывных нарушений в сфере взаимодействия оснований проектируемых сооружений с геологической средой не выявлено.

Надо отметить, что ВЭС по своим параметрам относятся к уникальным объектам и накоплен обширный мировой опыт мониторинга эксплуатации таких объектов, который показывает, что большая часть аварий и разрушения подобных объектов происходила из-за падения опоры с полным выкорчевыванием фундамента. Причины таких аварий до сих пор не установлены. Поэтому изыскания на территории проектируемого ветропарка проводились с расчетом размещения большинства объектов на свайном фундаменте.

В составе буровых работ было осуществлено бурение опорных технических скважин глубиной до 40 м для выявления общих закономерностей геологического строения и гидрогеологических условий. Глубина скважин определялась с учетом предполагаемой глубины заложения свайных фундаментов 16-35 м.

Бурение скважин производилось с отбором проб грунта нарушенной и ненарушенной структуры, для определения физико-механических свойств и коррозионной активности грунтов. Интервал опробования, с учетом возможного распространения специфических грунтов, составлял один метр.

На отобранных образцах грунтов был проведен полный комплекс лабораторных исследований, с целью изучения физико-механических и специфических свойств. Была определена относительная деформация набухания без нагрузки. На образцах грунтов, проявивших набухающие свойства, выполнен комплекс определений относительной деформации набухания-усадки под нагрузками на образцах ненарушенной и нарушенной структуры.

В список проводимых испытаний был включен гранулометрический состав глинистых грунтов ареометрическим методом, а песчаных – ситовым в соответствии с [3].

Абс. отметка
устья: 82,17 м

Скважина № 141

Глубина: 40,0 м
Дата бурения: 03.02.2020

Геологический индекс	С.И.	Глубина пополам, м	Мощность слоя, м	Абсолютная отметка, м	Описание грунтов	Разрез скважины	Глубина, м	Подземная вода Абс. отм. Дата замера
eQ_{II}	1a	1,2	1,2	81,0	Почва суглинистая темно-бурая, полутвердая, с включением остатков корневой системы растений.		1	77,67
	2*	4,0	2,8	78,2	Суглинок бурый, твердый, с включением карбонатов до 7%.		2	
dQ_{II}	3*	10,2	6,2	72,0	Суглинок бурый, тугопластичный, с включением карбонатов до 5%.		3	65,57
	6*	16,0	5,8	66,2	Глина бурая, с затеками серой, тугопластичная, с прослоями и линзами песка мелкого бурого, с включением мелкой ракушки.		4	
aQ_{II}	8*	28,0	12,0	54,2	Песок средней крутиности бурый, средней плотности, водонасыщенный, с включением мелкой битой ракушки до 5%, с прослоями глины мягкопластичной до 20 см.		5	65,57
							6	
dQ_{II}	6*	33,7	5,7	48,5	Глина бурая, с затеками серой, тугопластичная, с прослоями и линзами песка мелкого бурого, с включением мелкой ракушки.		6	65,57
							7	
aQ_{II}	8*	40,0	6,3	42,2	Песок средней крутиности бурый, средней плотности, водонасыщенный, с включением мелкой битой ракушки до 5%, с прослоями глины мягкопластичной до 20 см.		8	65,57
							9	

Рис. 1. Типовая ИГ колонка района изысканий.

В составе полевых испытаний выполнялись статическое и динамическое зондирование с целью уточнения показателей прочностных и деформационных свойств грунтов в условиях их естественного залегания [4].

Статическое зондирование выполнялось для определения однородности грунтов в плане и по глубине, уточнения границ залегания выделенных элементов, определения показателей физико-механических свойств дисперсных грунтов, определения лобового сопротивления конусу зонда по ИГЭ.

Динамическое зондирование требовалось на участках распространения песчаных грунтов для уточнения условий залегания и ориентировочной оценки разжижения песков при динамических нагрузках.

Учитывая распространение набухающих глин в основании проектируемого фундамента, которые при изменении своей влажности в период строительства и эксплуатации могут способствовать возникновению опасных напряжений, влекущих за собой деформацию и разрушение сооружений ветропарка, было организовано проведение штамповых испытаний. Полевые испытания грунтов штампами производились после расчленения массива грунтов на инженерно-геологические элементы и на основе принятых окончательных проектных решений по типу и глубине заложения фундаментов. Испытания выполнялись в шурфах плоским штампом с площадью 5000см². Для каждого характерного инженерно-геологического элемента производились не менее двух испытаний.

Учитывая, что на исследуемой территории требовалось дать заключение об оценке карстоопасности, бурение проводилось в комплексе с геофизическими и гидрогеологическими работами.

Гидрогеологические работы включали в себя как гидрогеологическое наблюдение при буровых работах, опытно-фильтрационных работах, так и гидрохимические исследования, которые позволили определить состав вод, ее агрессивность по отношению к строительным материалам и оценить влияние воды на развитие карстовых процессов.

Анализ агрессивности воздействия подземных вод на строительные конструкции позволило сделать вывод об очень сильном их воздействии. Согласно выводам из таблиц В4 и В5 [5], только для бетонных конструкций, изготовленных из бетона высокой степени водонепроницаемости, это действие оказывается щадящим. Аналогично можно сказать вывод о воздействии подземных вод на арматуру железобетонных конструкций согласно табл. Г.2 [5]. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1.										
Степень агрессивного воздействия подземных вод										
Водоносный горизонт	Глубина залегания подземных вод, м	Расчетное содержание компонентов, мг/дм ³				Степень агрессивного воздействия подземных вод				
						на бетонные конструкции при марке бетона по водонепроницаемости W ₁₆ – W ₂₀			на арматуру ж/б конструкций	
		HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Mg ²⁺	портланд цемент	портланд цемент с добавками	сульфатостойкий цемент	при погружении	при смачивании
I	2,4-9,4	4,95	6693	9790	1160	C/агр	H/агр	H/агр	Сл/агр	C/агр
II	6,4-16,6	5,23	7403	8111	1353	C/агр	H/агр	H/агр	Сл/агр	C/агр

C/агр – Сильноагрессивная
H/агр – Неагрессивная
Сл/агр – Слабоагрессивная

В ходе выполнения работ было пройдено более пятидесяти сейсмопрофилей (СЗ-сейсмозондирований), а общее число физических наблюдений составило около 2100. Также было выполнено вертикальное электрическое зондирование с более чем 900 наблюдениями.

В результате проведенных исследований карстовых процессов на территории планируемого строительства не обнаружено.

По итогу проведенных инженерно-геологических изысканий можно сделать вывод о соответствии выбранной территории требованиям, предъявляемым к размещению объектов ветроэнергетики.

Согласно п. 7.1.2 [6] инженерно-геологические изыскания для строительства ВЭС в дополнении к обязательным должны также обеспечить достаточными данными об инженерно-геологических условиях района проектируемых сооружений, включая: получение данных об обеспеченности строительства местными строительными материалами для обоснования выбора типов сооружений, их компоновки и конструкции и разработку системы геомониторинга неблагоприятных процессов и организацию соответствующих режимных наблюдений в соответствии с [7].

При получении данных о наличии местных строительных материалов, была установлена достаточность обеспечения проектируемого сооружения песком и песчано-гравийным материалом. В ходе изысканий было подтверждено наличие песчаника, известняка-ракушечника, валунно-песчано-гравийной смеси и кварцевого песка. Запасы известняка – ракушечника составляют 4,7 тыс. м³, песчаника – 610,9 тыс. м³. К особенностям их залегания можно отнести то, что они залегают вдоль берегов рек, в данном случае: Калаус и Б.Кугульта. Добываются они открытым способом, а мощность пластов достигает 15 м.

С учетом результатов изысканий, в программу геомониторинга неблагоприятных процессов и организацию соответствующих режимных наблюдений объектов ВЭС для территории Ипатовского района необходимо включить геотехнический мониторинг фундаментной части конструкции.

Для проведения мониторинга фундаментной части можно предложить инструментальные наблюдения за фундаментами в составе геодезических наблюдений и наблюдением за уровнем подземных вод [8].

Геодезические наблюдения рекомендуется проводить путем организации опорно-высотной сети путем установки рабочих реперов и кустов фундаментальных реперов. А для контроля за осадками фундамента установить выносные марки по 4 шт. на каждый фундамент ветровой установки.

Для контроля уровня подземных вод необходимо организовать на площадках размещения ВЭУ установку опускных пьезометров, часть из которых будет оснащена пьезодинамометрами для проведения наблюдений в автоматизированном режиме.

Литература

1. *СТО РусГидро 03.01.101-2013 Ветроэлектростанция. Правила разработки схем территориального планирования и проектной документации: Стандарт организации: издание официальное: утвержден и введен в действие от 17 марта 2014 г. Приказом ОАО РусГидро № 185/пр : введен впервые – Москва : [б. и.], 2013. – 89 с. –(Система нормативных документов в строительстве).*
2. *Северокавказский округ. Ставропольский край. Карта общего сейсмического районирования со степенью сейсмической активности С (1%) [Электронный ресурс] // Тематические карты СПбГУ: информ.-справочный портал. URL https://hge.spbu.ru/magis/subekt/stavropol/81_osr1_Stavropol.pdf*
3. *ГОСТ 12536–2014 Грунты. Методы лабораторного гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава: Национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие от 12 декабря 2014 г. Приказом Федерального агентства по тех.регулированию № 2022/ст : введен взамен ГОСТ 12539-79 – Москва : [б. и.], 2014. – 22 с. –(Система нормативных документов в строительстве).*
4. *ГОСТ 30672–2019 Грунты. Полевые испытания. Общие положения: Национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие от 21 июля 2020 г. Приказом Федерального агентства по тех.регулированию № 383/пр : введен взамен ГОСТ 30672-2012 – Москва : [б. и.], 2020. – 8 с. –(Система нормативных документов в строительстве).*
5. *СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии: Свод Правил Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие от 27 февраля 2017 г. Приказом Министерства строительства № 127/пр : введен взамен СП 28.13330.2012 – Москва : [б. и.], 2017. – 118 с. –(Система нормативных документов в строительстве).*
6. *ВСН 34.2–88 Инженерно-геологические изыскания для гидроэнергетических сооружений: Ведомственные строительные нормы: издание официальное: утвержден и введен в действие от 4 июля 2009 г. Приказом НП ИНВЭЛ № 50/пр : введен впервые – Москва : [б. и.], 2009. – 46 с. –(Система нормативных документов в строительстве).*

7. *СТО 70238424.27.100.059–2009 Ветроэлектростанции (ВЭС). Условия создания. Нормы и требования: Стандарт организации: издание официальное: утвержден и введен в действие от 14 декабря 1988 г. Приказом Министерства энергетики и электрофикации СССР № 419/пр : введен впервые – Москва : [б. и.], 1989. – 99 с. – (Система нормативных документов в строительстве).*
8. *Ихсанов Р.М., Караськов И.А., Сермавбрин Н.В. Организация геотехнического мониторинга фундаментных конструкций ветроэлектроустановок на примере проектирования и строительства Адыгейской ВЭС// Гидротехническое строительство.—2020.— №12.— с.26-31*

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕБЕННОГО РЕЛЬЕФА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОЩАДКИ БАЛАКОВСКОЙ АЭС

И.М. Кравченко¹, А.С. Гусельцев², Е.А. Пикулик¹, В.М. Макеев¹

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия/ E-mail: kravchenkoilyamax@yandex.ru

²Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности,
ул. Малая Красносельская, 2/8, к. 5, Москва, 107140 Россия. E-mail: gouseltsev@secnrs.ru

Атомные электростанции относятся к особо опасным и технически сложным объектам повышенного уровня ответственности [5, 6], которые требуют специального подхода к проведению инженерных изысканий. Расположение АЭС в долинах крупных рек определяет специфику изучения отложений, которые, как правило, являются фациально изменчивыми, песчаными и глинистыми. Отложения характеризуются различным водонасыщением и консистенцией. Изучение условий залегания этих отложений позволяет получить представление о погребенных формах рельефа – палеорельефе и об экзогенных и эндогенных процессах.

В соответствии с действующими нормативными документами [4], изучение палеорельефа площадок размещения АЭС не входит в задачи инженерно-геологических изысканий. Однако, палеорельеф сложен разными по составу, свойствам и генезису отложениями. К ним нередко приурочены ослабленные зоны, для которых характерны повышенная проницаемость и пониженные физико-механические свойства. Это может оказывать влияние на напряженно-деформированное состояние грунтовых оснований зданий и сооружений АЭС, а также на гидродинамическую обстановку и активность экзогенных геологических процессов.

Балаковская АЭС (БалАЭС) расположена в одноименном районе Саратовской области, на левом берегу Саратовского водохранилища, воды которого находится на абс. отметках +28 м (Рис. 1). Ее площадка приурочена ко второй надпойменной террасе р. Волга с абс. отметками +30-38 м. В нее врезана первая терраса, которая вместе с поймой затоплена водохранилищем.

Несмотря на комплексность изучения инженерно-геологических условий площадки АЭС, в том числе физико-механических свойств грунтов, основные здания и сооружения АЭС испытывают неравномерные осадки и крены, причины которых до настоящего времени в полной мере не изучены. Одной из причин смещений инженерных сооружений могут быть погребенные формы рельефа, выполненные разными по составу и свойствам отложениями [1, 3]. Выражением этих форм являются погребенные русла, ложбины и др. неровности погребенных поверхностей (все вместе врезы). К ним часто приурочены суффозионные и др. процессы. Врезы заполнены изменяющимися по вещественному и гранулометрическому составу отложениями – русловыми, пойменными и старичными фациями, влекущими за собой изменение гидрогеологического режима и физико-механических свойств грунтов. Палеорельеф может являться одним из факторов, влияющим на осадки и крены фундаментов зданий и сооружений АЭС [1, 2].

Площадка размещения Балаковской АЭС характеризуется геологическим строением, структурно-геоморфологическими, гидрогеологическими условиями и данными геодезических наблюдений.

В геологическом строении участвуют отложения верхнего, среднего и нижнего отделов четвертичной системы, а также среднеюрские отложения. С поверхности на площадке залегают техногенные грунты. Строение разреза изучено до глубины 150 м.

Техногенные образования (tQ_{IV}) развиты на площадке в связи с планировочными работами. Среди них различаются грунты балластной «подушки», представленные щебенистыми и гравийными разностями доломитового состава, и грунты обратной засыпки пазух котлованов энергоблоков (пески мелкие и средние с включением щебня и дресвы доломита), включая глиняный «замок» (суглинки и глины). Общая мощность грунтов достигает 14-20 м. Площадка АЭС спланирована до уровня +34 м, что на 6 м выше современного уреза Саратовского водохранилища.

Верхний отдел четвертичной системы (aQ_{III}) состоит из верхне-, средне- и нижневалыньских аллювиальных отложений. По генезису они являются аллювиальными (1-я терраса соответствует



Рис. 1. Местоположение площадки Балаковской АЭС (снимок Google Earth).

сарпинскому и енотаевскому горизонтам) и аллювиально-морскими (2-я терраса соответствует тершкинскому горизонту). Обе террасы соответствуют хвалынскому надгоризнту.

Верхне- и среднехвалынские отложения являются лиманными ($fsQ_{III}hv_3$, $limQ_{III}hv_2$) и озерно-лиманными ($l-limQ_{III}hv_2$). Сверху вниз по разрезу залегают суглинки с включениями гидроокислов марганца и перегнивших корней растений мощностью до 1,5 м; глины твёрдые и полутвёрдые мощностью до 2 м; суглинки макропористые, известковистые от полутвёрдой до текучепластичной консистенции. Эти отложения были полностью удалены в процессе сооружения котлована под реакторные отделения и машинные залы.

Нижнехвалынские отложения ($aQ_{III}hv_1$) по литолого-генетическим признакам разделены на пойменную ($a^{pr}Q_{III}hv_1$), старичную ($a^{st}Q_{III}hv_1$) и русловую ($a^{rl}Q_{III}hv_1$) фации. Под озерно-лиманными отложениями сверху вниз по разрезу залегают глины от твердой до мягкопластичной консистенции мощностью до 7,0 м; глины от твердой до тугопластичной консистенции с комковатыми известковистыми мощностью до 9,2 м; суглинки и глины от полутвердой до текучепластичной консистенции с включениями карбонатов и прослоями пылеватого песка мощностью до 5 м; пески пылеватые, мелкой и средней крупности с редкими прослоями глин и суглинков мощностью от 11 до 21 м.

Средний отдел (aQ_{II}) состоит из верхнего и нижнего горизонтов. Верхний горизонт представлен отложениями русловой фации (aQ_{II}^2): песками преимущественно мелкими и средней крупности, реже пылеватыми с тонкими прослоями суглинка мощностью 2,6-15,5 м. Нижний горизонт соответствует русловой и старичной фациям. Старичная фация ($a^{st}Q_{II}^1$) сложена глинами, суглинками и супесями с тонкими прослоями песка мощностью 0,7-13,0 м. Русловая фация (aQ_{II}^1) представлена песками от пылеватых до крупных, реже супесями, с включениями гравия и гальки песчаника мощностью 16,4-23 м.

Нижний отдел (a^4Q_I) сложен аллювиальными отложениями четвертой (тарлыкской) террасы: глинами, суглинками, супесями и песками различной размерности мощностью от 37,7 до 40,7 м. Их формирование связывается с верхнебакинской регрессией морского бассейна. Физико-механические свойства грунтов неясны.

Среднеюрские отложения батского яруса (J_2bt) представлены глинами от полутвердой до твердой консистенции, с прослоями и линзами алевролита и известняка, с включениями пирита, с редкими тонкими прослоями песчаника. Вскрытая мощность отложений составляет около 40 м.

Структурно-геоморфологические исследования с привлечением геолого-геофизических и буровых данных были направлены на исследование четвертичных отложений с наложенным аккумулятивным типом строения террас. На регрессивных аллювиальных отложениях третьей террасы залегают трансгрессивная аллювиально-морская вторая терраса. К ней прислонена аллювиальная первая терраса, находящаяся за пределами рассматриваемой площадки под водами водохранилища.

Тектоно-климатическая цикличность явилась причиной формирования регрессивно-трансгрессивного типа четвертичных отложений. Речной режим, изменяющийся под влиянием тектоники и климата, формировал разнотипные по генезису террасы с разным составом отложений, включая русла, врезы и ложбины. В результате в низах разрезов при отступлении моря накапливались аллювиальные фации, в верхах при трансгрессии – морские. Вторая терраса, на которой находится площадка, является типичной с точки зрения цикличности, т.е. аллювиально-морской с остракодами (аллювио-мариний).

Палеоврезы, заполненные разнотипными отложениями, были выделены в трех разноглубинных горизонтах (неровных поверхностях): 1) в подошве среднехвалыньских озерно-лиманских отложений, 2) в подошве пойменных и старичных отложений и 3) в подошве русловой фации второй террасы, т.е. по границе второй и третьей погребенных террас. Большая часть разноглубинных врезов согласуется между собой снизу вверх по разрезу, что дает основание делать вывод об их сквозном характере развития. Врезы прослеживаются сразу на нескольких горизонтах (на двух и более).

Выделенные врезы очевидно связаны с более крупными палеоврезами. В основании третьей террасы находится ниже-средне-неоплейстоценовая сингильская палеодолина ($aQ_{II,sn}$). Широко распространение получили погребенные доапшеронские и доакчагыльские палеодолины Волги. Их тальвеги находятся на относительно небольшой глубине от минус 35 м до минус 75 м. Затопленная пойма р. Волги находится на высоте всего +12 м. Относительно ее поверхности уровень Саратовского водохранилища был поднят на 13 м. Небольшая глубина палеотальвегов (47 м) и наличие обширного водохранилища не могло не сказаться на увеличении водонасыщенности отложений, создало условия для повышенного обмена поверхностных и подземных вод.

Характерным для рассматриваемых палеоврезом является их простираемость и сквозной характер строения. На земной поверхности с ними согласуются малозаметные ложбины, которые на космоснимках дешифрируются в виде линеаментов (Рис. 2). Они согласуются с простираемостью расположенного рядом с площадкой прямолинейного оврага Котомин и в целом с транзитной зоной линеаментов, пересекающих ближний район БалАЭС. Эти и другие аргументы позволили отнести линеаменты к современным зонам геодинамического типа с повышенной проницаемостью. В юрских отложениях они выражены повышенной трещиноватостью сбросового типа. В нелигитифицированных обводненных четвертичных отложениях с ними связываются аномалии газо-флюидной проницаемости и снижение физико-механических свойств.

Гидрогеологические условия изменяются под влиянием геодинамических зон. Эти нарушения могут перераспределять и концентрировать потоки грунтовых и напорных вод [1-3]. В отложениях формируются фильтрационные гидрогеологические окна (депрессии), образуются избыточное обводнение с образованием куполов и градиентные зоны изменения скорости потока. Геодинамические зоны часто являются каналами, по которым происходит интенсивная суффозия, активизация суффозионных, карстовых, оползневых и др. процессов [1]. Эти процессы могут приводить к развитию опасных осадков и кренов зданий и сооружений, связанных с экологически опасным производством.

Гидрогеологические условия БалАЭС характеризуются наличием двух основных водоносных горизонтов: верхнего грунтового и нижнего напорного. Первый безнапорный горизонт со средним многолетним уровнем 3,5 м приурочен к озерно-лиманским суглинкам, распространенным локально. Второй – напорный приурочен к аллювиальным отложениям. Воды аллювиального горизонта вскрыты на глубинах от 16 до 21 м, их напор изменяется от 4 до 17 м. При этом пьезометрическая поверхность водоносного горизонта на участке энергоблоков 1-4 располагается ниже поверхности озерно-лиманного горизонта.

С учетом того, что фундаментные плиты энергоблоков уложены на балластную «подушку», подошва которой лежит на слабопроницаемых глинах пойменной фации нижнехвалыньского аллювия, а по периметру она ограждена глиняным «замком», выполненным от верха щебеночной «подушки» до кровли пойменных глин, можно утверждать, что фундаменты энергоблоков по принятым про-

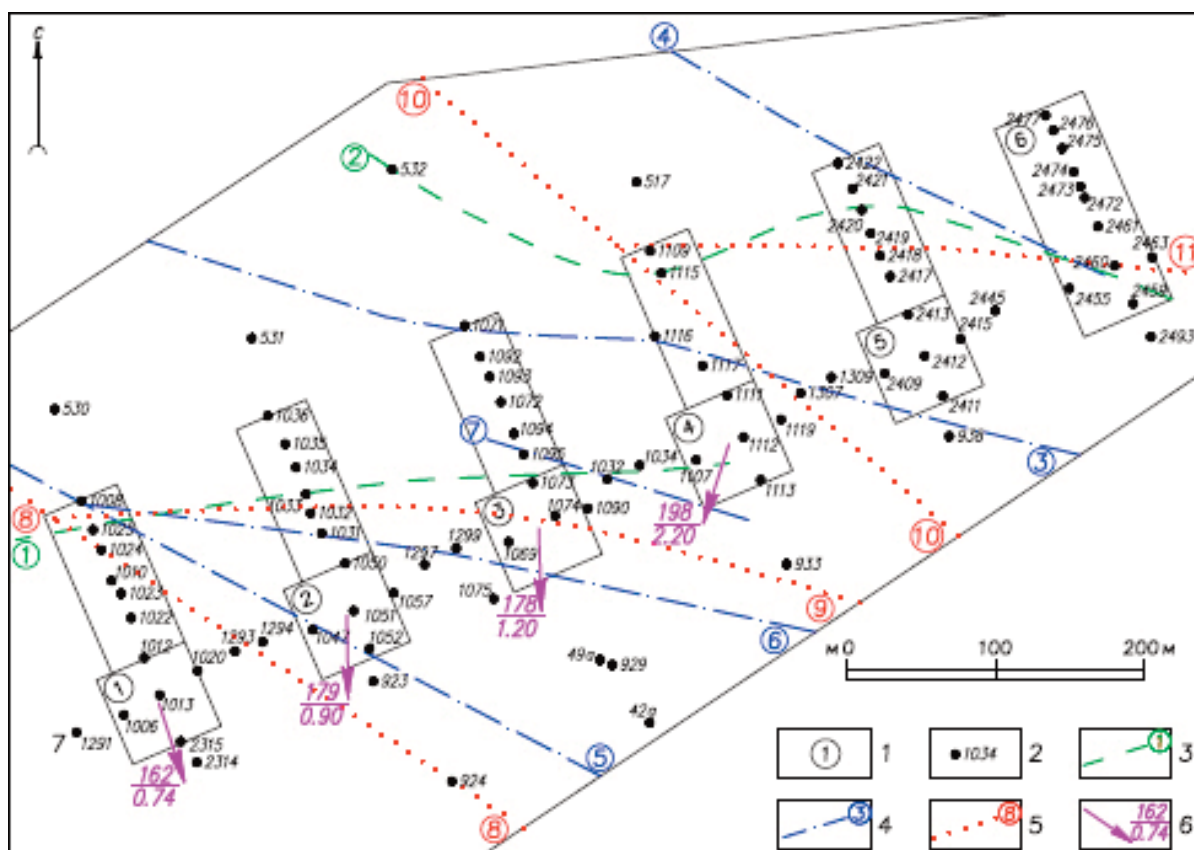


Рис. 2. Линеamentные зоны площадки БалаАЭС.

1 – Реакторные отделения и их номер, 2 – инженерно-геологические скважины и их номер. 3-5 Линеamentные зоны и их номер, согласующиеся спалеоврезами в четвертичных отложениях, установленные: 3 – в подошве озерно-лиманных отложений (№1, 2), 4 – в подошве пойменных и старичных отложений (№3-7), 5 – в подошве русловых отложений (№8-11). 5 – крены фундаментов реакторных отделений: в числителе – азимут, град., в знаменателе – величина относительного крена, мм/м.

ектным решениям должны быть изолированы от окружающего их озерно-лиманного горизонта. Тем не менее, за счёт инфильтрации атмосферных осадков, техногенных утечек из водонесущих коммуникаций, и, возможно, в результате перетекания из грунтового водоносного горизонта в щебенистом основании энергоблоков сформировался техногенный водоносный горизонт, водовмещающими грунтами которого являются щебень доломита и песчано-щебенистые грунты.

4) Геодезические многолетние наблюдения за смещениями фундаментов зданий и сооружений БалаАЭС показали возможную связь неравномерных осадок и кренов реакторных отделений энергоблоков 1-4 с проницаемыми геодинамическими зонами.

Причины негативных процессов проанализированы на промплощадках РО-1, РО-2, РО-3 и РО-4.

РО-1 подвергается осадке, равной 43,6 см, что соответствует 145% от предельного значения. Относительный крен фундамента РО-1 равен 0,74 мм/м, что составляет 74% от контролируемого предельного значения (1,0 мм/м). Крен фундамента ориентирован по азимуту 162° в направлении протяженной линеamentной зоны северо-западного простирания. Зона согласуется с погребенными эрозийными формами, находящимися на разных глубинах четвертичных отложений.

РО-2 испытывает среднюю осадку фундамента, которая составляет 50,8 см, что соответствует 169% от предельного значения. Относительный крен фундамента РО-2 равен 0,9 мм/м, что составляет 90% от предельного значения. Крен фундамента ориентирован по азимуту 179° в сторону локализации двух разобнесенных друг от друга, но согласных по простиранию линеamentных зон северо-западного простирания. Они согласуются с пологими и широкими врезами, выделенными на разных глубинах четвертичных отложений.

РО-3 претерпевает осадку, средняя величина которой составляет 55,0 см, что соответствует 183% от предельно-допустимого значения. Крен фундамента РО-3 равен 1,2 мм/м, что отвечает 120% от предельного значения (1,0 мм/м). Направление крена – 178°. Грунтовое основание РО-3 пересекается несколькими геодинамическими зонами. Часть их них №6 и 9 согласуются с относи-

тельно глубоким врезом ступенеобразной формы, амплитуда которого составляет от 4 м до 6 м. Три других зоны (№1, 3 и 7) пересекают машзал РО-3. Субширотная зона №1, выделенная по подошве озерно-лиманных отложений, очень протяженная. У РО-2 она согласуется с понижением подошвы доломитовой подушки, толщина которой несколько увеличена. Характерно, что три РО (1-3) крятся по азимуту 162°-178°исключительно в сторону этих зон.

РО-4 подвергается осадке фундамента в среднем на 47,3 см, что соответствует 158% от предельного значения. Относительный крен фундамента РО-4 составляет 2,2 мм/м, что соответствует 221% от предельного значения. Направление крена – 198°. Грунтовое основание РО-4 пересекается двумя линеаментными зонами (№1 и 7), перпендикулярно к простиранию которых направлен крен фундамента. Зона №1 согласуется с Котоминским линеаментом, проходящим севернее площадки АЭС. Зона №7 согласуется с погребенным углубленным врезом (8 м), выполненным супесчаными отложениями.

Следует признать, что в большинстве случаев скважины, необходимые для выявления погребенных неровностей рельефа, пробурены на площадках реакторных отделений и машзалов, и мало скважин за их пределами, включая площадку. Многие скважины не глубокие и не вскрывают подошву второй террасы. Четвертичное строение погребенных горизонтов на площадке в целом и особенно за ее пределами, включая данные по геодинамическим зонам, требует дополнительных исследований.

Выводы

1) Литолого-генетическое строение второй верхнечетвертичной террасы, на которой расположена площадка Балаковской АЭС, неоднородно. В ней выделяются разнотипные по морфологии погребенные врезы, сложенные разнородными по составу и строению отложениями. Для них является характерной относительно большая протяженность и часто сквозной снизу вверх по разрезу характер развития. В рельефе, достаточно выравненном, они согласуются со слабо выраженными ложбинами. Дешифрирование космоснимков позволило выделить линеаменты, согласующиеся с ложбинами, сравнить их с врезами, уходящими на большую глубину. В среднеюрских отложениях, залегающих в основании четвертичных отложений на глубине более 50 м с ними связаны зоны трещиноватости сбросового типа, установленные в юрских и меловых отложениях во время полевых работ 2014 г.

2) Линеаменты являются преимущественно однотипными по простиранию, характеризуются заметной протяженностью и глубинным характером заложения. Они согласуются с более протяженными зонами линеаментов с трансзональным развитием, пересекающим левобережье и правобережье Волги. С ними могут согласовываться разновозрастные русла, врезы и ложбины, связанные с древними доакчагыльскими, доапшеронскими и сингильскими врезами и характером строения современной долины р. Волга. Эти и другие признаки позволяют отнести их к геодинамическим зонам. Формирование зон связывается с повышенной активностью опускающейся Прикаспийской впадины, выраженной в приповерхностной части напряжениями растяжения. В этих условиях в таких зонах формируется повышенная трещиноватость открытого типа со сбросовым характером развития.

3) Результаты многолетних геодезических наблюдений за реакторными отделениями БалАЭС показали, что осадки их фундаментов превышают предельно-допустимые значения, как и величины относительных кренов фундаментов РО-3 и РО-4. Исключением являются РО-1 и РО-2, где относительные крены меньше предельного – 1 мм/м. Причины такого поведения фундаментов реакторных отделений могут быть обусловлены линеаментными (геодинамическими) зонами, характеризующимися повышенной проницаемостью и снижением физико-механических свойств грунтов. Они согласуются с погребенными, относительно высокоградиентными врезами, выполненными разнотипными по составу и строению отложениями, с которыми связывается перераспределение грунтовых и напорных вод.

4) Исследования показали, что геодинамическая активность погребенных палеоврезов и проницаемость слагающих их грунтов недооценивается при определении причин и механизмов осадок энергоблоков. С палеоврезами связывается пространственная изменчивость литолого-генетических типов отложений, а по сути динамических фаз аллювия, определяющих интенсивность осадконакопления, состав отложений и их современные свойства. При прогнозировании поведения грунто-

вых оснований зданий и сооружений, а также при оценке возможного развития суффозионных процессов необходимо учитывать погребенные неоднородности, связанные с особенностями строения четвертичных отложений и степени изменчивости их физико-механических характеристик.

Литература

1. Макарова Н.В., Гусельцев А.С., Суханова Т.В., Макеев В.М. Геологические условия развития суффозионных процессов и их активность на Сальско-Донском неотектоническом поднятии // *Геоэкология*. 2019. №6, с. 19-29
2. Макеев В.М., Гусельцев А.С., Кравченко И.М. Проблема выявления ослабленных зон при изучении инженерно-геологических условий (на примере территории Бушерской АЭС) // *Геоэкология*. 2020. №5, с. 24-31
3. Пикулик Е.А., Макеев В.М., Суханова Т.В. Структурно-геоморфологические исследования района среднего течения Дона // *VIII Щукинские чтения: рельеф и природопользование*. Москва МГУ им. М.В. Ломоносова. 2020.
4. СП 151.13330.2012 Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС. Часть I. Инженерные изыскания для разработки предпроектной документации (выбор пункта и выбор площадки размещения АЭС)
5. Федеральный закон от 29.12.2004 N 190-ФЗ «Градостроительный кодекс Российской Федерации» // <http://www.pravo.gov.ru>
6. Федеральный закон от 30.12.2009 N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» // <http://www.pravo.gov.ru>

КАРБОНАТНЫЕ ЭЛЮВИАЛЬНЫЕ ГРУНТЫ БУГУЛЬМИНСКО-БЕЛЕБЕЕВСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

А.И. Латыпов, А.Н. Гараева, Э.А. Королев

Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Республика Татарстан, г. Казань ул. Кремлевская 4/5.
E-mail: airatlat@mail.ru

Бугульминско-Белебеевская возвышенность занимает большой участок юго-восточной части Волго-Уральской антеклизы Восточно-Европейской платформы. Она представляет собой холмистую равнину с высотными отметками 320-450 м. С севера возвышенность ограничена долиной реки Кама, с юго-запада – Мелекесской низменностью, постепенно спускающейся к Волге, с востока – долиной реки Ик. Характерной особенностью Бугульминско-Белебеевской возвышенности является ступенчатость рельефа [2]. Водоразделы носят платообразный характер и представляют собой останцы древних денудационных поверхностей, разделенных уступами [6].

Эрозионно-денудационные останцы сложены породами казанского и уржумского яруса среднепермского возраста. Казанские отложения формировались в условиях мелководно-морского бассейна. Они представлены зеленовато-серыми песчаниками, светло-серыми известняками и доломитами. Уржумские отложения формировались в континентальных условиях, за счет сноса терригенного материала с разрушающихся Уральских гор. Они представлены красноцветными песчаниками, глинами и мергелями с небольшими по толщине прослойками доломитов. На юго-восточном участке Бугульминско-Белебеевской возвышенности отложения уржумского возраста размыты. За счет этого на выположенных вершинах и склонах останцев обнажаются карбонатно-терригенные породы верхней части разреза казанского яруса. Начиная с плиоцена на рассматриваемой территории активно протекали процессы физико-химического выветривания и выноса обломочного материала в понижения долин малых рек. За счет этого и был сформирован современный абразионно-аккумулятивный рельеф Бугульминско-Белебеевской возвышенности с перепадами в 150-260 м.

Промышленное освоение территории привело к необходимости возведения в пределах Бугульминского плато многочисленных объектов и сооружений нефтедобывающего производства и сопутствующих гражданских объектов. Высокий уровень ответственности многих сооружений объектов нефтедобычи подразумевает наличие повышенных требований и к проектированию оснований фундаментов инженерных конструкций. В частности, основные проблемы при прокладке нефте- и газопроводов и обустройстве оснований станков-качалок возникают с грунтовой толщей верхней части геологического разреза, подвергшейся воздействию гипергенных процессов. Высокая степень структурной неоднородности грунтов зоны гипергенеза обуславливает их принадлежность к категории специфических грунтов, требующих дополнительных инженерно-геологических исследований. Между тем, на исследуемой территории до настоящего времени мало известно об особенностях распространения элювиальных отложений в массивах, их строение, степени выветрелости пород и изменениях физико-механических свойств по разрезу. Учитывая это, было проведено изучение элювиальных отложений, развивающихся по карбонатным породам Бугульминско-Белебеевской возвышенности.

Методика изучения включала в себя описание и фотодокументацию стенок карбонатных карьеров, вскрывающих разрезы зоны гипергенеза. При описании вскрытых разрезов выделялись слои пород различной степени преобразованности, отмечались особенности их сложения и минерального состава. Попутно проводился отбор образцов пород для определения их физико-механических свойств. В общей сложности было исследовано 26 карьеров, расположенных в пределах Бугульминского плато.

Анализ распространенности элювиальных толщ показал, что в пределах Бугульминско-Белебеевской возвышенности широко распространены коры выветривания в начальной стадии формирования. Они покрывают практически все выположенные вершины эрозионно-денудационных останцев. На склонах останцев элювиальные отложения не выражены либо отсутствуют за счет постоянного сноса выветрелого обломочного материала. В долинах малых рек элювий захоронен под относительно мощной толщей делювиальных и аллювиальных отложений. Таким образом, опре-

деленную проблему составляют элювиальные грунты выложенных вершин эрозионно-денудационных останцев, слагающих верхнюю часть карбонатных массивов, поскольку именно они в большинстве случаев находятся во взаимодействии с инженерными сооружениями.

Анализ геологических разрезов верхней части карбонатных массивов, подвергшихся изменениям под действием экзогенных факторов, позволил установить закономерности преобразования пород под влиянием процессов гипергенеза. В исходном, неизменном, состоянии известняки и доломиты, слагающие эрозионно-денудационные останцы, представляют собой плотные породы, светло-серой окраски, с микро-тонкозернистой структурой, массивной или неясно-слоистой текстурой за счет наличия глинистых слоев. Карбонатные породы в массивах разбиты системами вертикальных и горизонтальных трещин на крупноблочные отдельности. Протяженные трещинные фильтрационные каналы раскрытостью до 5,0 см обусловили хорошую дренированность верхней части эрозионно-денудационных останцев, исключая образования здесь застойных водоемов или заболоченных понижений. Таким образом, породы зоны гипергенеза большую часть времени находились в условиях низкой увлажненности, что существенно замедлило интенсивность их выветривания.

В геологических разрезах, где процессы выветривания зашли более глубоко, по поверхностям карбонатных массивов эрозионно-денудационных останцев развиваются молодые коры выветривания площадного типа мощностью до 4,0-6,0 м. В основании кор выветривания лежат плотные, слабо трещиноватые известняки, сложенные микрозернистым кальцитом. Однородный минеральный состав и структура предопределили высокую устойчивость пород к процессам выветривания. За счет этого они в большей части разрезов стенок карьеров являются ложем для покровных элювиальных отложений. На плотных известняках согласно залегают более разуплотненные карбонатные породы, разбитые системами вертикальных и горизонтальных трещин на крупно плитчатые отдельности. Снизу вверх по разрезу последовательно увеличивается количество пересекающихся трещин, возрастает степень их раскрытия, в полостях разрывных нарушений появляется иллювиальный тонкодисперсный карбонатный материал. Соответственно, снизу вверх уменьшаются размеры блоков отдельностей с блочной параллелепипедной до грубо-, толсто- и средне-плитчатой. Мощность этого слоя составляет от 1,5 до 2,0 м. Особенностью слоя разуплотненных карбонатных пород является хорошая структурированность отдельностей. Все блоки и плитки, отделенные друг от друга трещинами, сохраняют особенности залегания и структурно-текстурные характеристики исходных известняков и доломитов. То есть, на начальной стадии гипергенного преобразования карбонатные породы подвергаются дезинтеграции, что приводит к увеличению их водо- и газопроницаемости.

Над слоем структурного элювия залегают более рыхлые известняки и доломиты, представляющие собой горизонт бесструктурного элювия. Слой бесструктурного элювия сложен разобщенными плиточками карбонатных пород, размеры которых уменьшаются снизу вверх по разрезу молодой коры выветривания. Если в пределах слоя структурного элювия блочные и плитчатые отдельности расположены упорядоченно, то здесь все тонкие плиточки разрушенных известняков и доломитов разориентированы по отношению друг к другу. В отдельных участках горизонта плиточки налегают друг на друга, в других - наклонены под углом 5-20°, в третьих - волнообразно изгибаются, образуя небольшие по амплитуде экзогенные складочки. Плиточки карбонатных пород разделены относительно широкими вертикальными и горизонтальными трещинами, заполненными тонкодисперсным карбонатным материалом с включениями дресвы. Мощность горизонта составляет от 0,3 до 0,6 м.

Венчает профиль молодой коры выветривания горизонт, сложенный карбонатной мукой с включениями угловатых обломков известняков и доломитов размером до 2,0 см. Карбонатная мука характеризуется рыхлым сложением, светло-серой окраской, преимущественно тонкозернистой структурой и однородной текстурой. В тонкозернистом слабосцементированном материале присутствуют разобщенные угловатые обломки исходных карбонатных пород. Дресва распределена неравномерно, снизу вверх наблюдается тенденция уменьшения количества крупнообломочного материала. В кровле горизонта карбонатная мука обогащается глинистым материалом, придающим элювиальным грунтам светло-бежевую окраску. Глинистый материал поступает из вышерасположенного почвенно-растительного слоя в период таяния снега и ливневых осадков. В отдельных разрезах стенок карьеров верхняя зона бесструктурного элювия имеет более сложное строение. В его пределах наблюдается переслаивание слоев различной степени преобразования. Слои карбо-

натной муки могут чередоваться со слоями тонкоплитчатых карбонатных пород сцементированных тонкодисперсным карбонатно-глинистым иллювием. Мощность слоя карбонатной муки варьирует от 0,3 до 0,8 м.

Перекрываются элювиальные отложения темно-бурыми делювиальными суглинками, поверх которых развивается почвенно-растительный слой. Толщина глинистого и почвенного слоя доходит до 0,5 м. На части вершин эрозионно-денудационных останцев делювиальные суглинки смыты временными потоками поверхностных вод. В этом случае почвенно-растительный слой развит слабо, на поверхность выходит уплотненная карбонатная мука. Атмосферные осадки периодически смывают рыхлые элювиальные отложения, что приводит к постепенному уменьшению мощности слоя бесструктурного элювия в разрезе молодой коры выветривания.

Как видно из строения бесструктурного элювия выветривание карбонатных пород сводится к физической дезинтеграции. Основным фактором выветривания являются сезонно-климатические перепады температур. Тонкие водные пленочки, заполняющие трещинки разгрузки и межзерновое пространство известняков и доломитов, оказывают расклинивающее действие на породы. С понижением температур поверхностная энергия незамерзающих поровых вод на границах с твердой минеральной фазой возрастает. Создающиеся напряжения разрывают межзерновые структурные связи в породах, способствуя их механическому разрушению [7]. Процессы химического выветривания отходят на второй план.

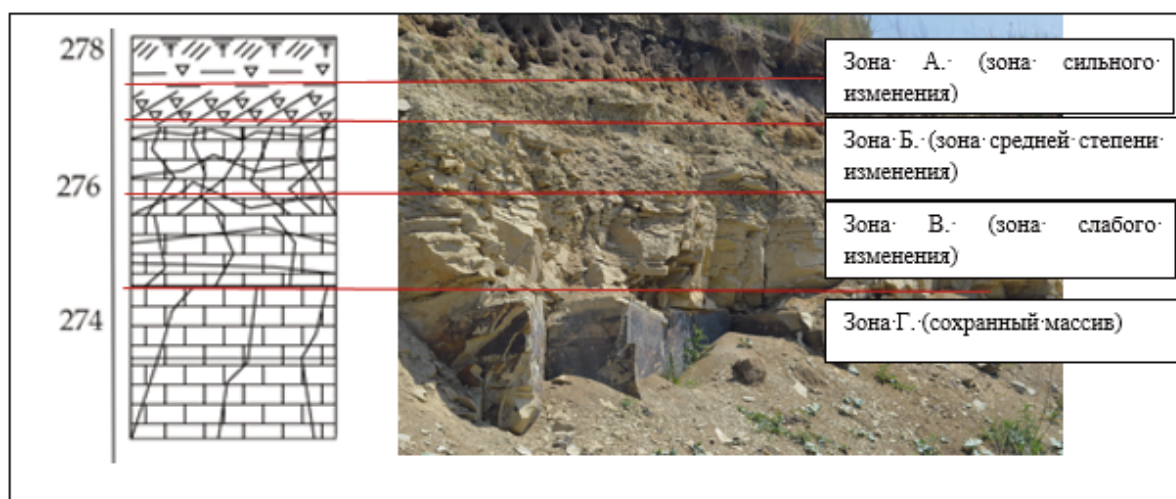


Рис. 1. Обобщенная схема по степени экзогенного изменения скальных грунтов согласно ГОСТ 25100 2011 и фото профиля залегания карбонатных пород на территории п. Райлан Бугульминский район.

Таким образом, в хорошо развитых профилях выветривания плоских вершин эрозионно-денудационных останцев четко выделяются две зоны: зона структурного элювия и зона бесструктурного элювия. Своеобразный карбонатный состав материнских пород привел к развитию здесь молодых кор выветривания обломочного типа. Отсутствие относительно мощной, развитой зоны химического выветривания связано с постоянным выносом тонкодисперсного материала плоскостными водами атмосферных осадков к подошве останцев, где из них формируются пролювиально-делювиальные шлейфы.

Отличия в сложении и структурных особенностях пород структурного и бесструктурного элювия предполагают различные подходы к изучению их физико-механических свойств. Зону развития структурного элювия по всем признакам можно отнести к скальным грунтам трещиноватых массивов. Их основные строительные свойства определяются степенью трещиноватости. Несмотря на высокие прочностные показатели пород в отдельных монолитах ($R_{сж.} = 14,8-72,4$ МПа) их устойчивость в массивах в целом будет определяться плотностью разрывных нарушений. Согласно работам

[3] устойчивость пород в трещиноватых массивах будет определяться размерами элементарных блоков отдельностей. Поэтому были проведены подсчеты геометрических параметров экзогенных трещин разгрузки и размеров отдельностей в бортах карьеров. Согласно полученным результатам в основании структурного элювия размеры блоков отдельностей в виде параллелепипедов варьируют по длине в пределах 25,0-50,0 см, по ширине - 20,0-30,0 см, по высоте - 15,0-25,0 см. Коэффициент трещиноватости ($K_{тр}$) составляет 5-10%. По классификации Л.И. Нейштадт [8] карбонатные породы структурного элювия по степени трещиноватости можно отнести к средне- и сильно-трещиноватым. В верхней части слоя структурного элювия, где преобладают плитчатые отдельности карбонатных пород, длина монолитных фрагментов составляет 5,0-15,0 см, ширина - 3,0-10,0 см, высота - 2,0-5,0 см. Плитчатые отдельности отделены друг от друга открытыми трещинами шириной до 1,0 см. Карбонатные породы верхней части структурного элювия можно отнести к очень сильно-трещиноватым ($K_{тр}=10-20\%$) и исключительно сильно-трещиноватым ($K_{тр}>20\%$). Одновременно, с увеличением коэффициента трещиноватости отмечается тенденция уменьшения прочностных характеристик карбонатных отдельностей в слое. Это хорошо видно при сравнении величин сопротивления известняков на одноосное сжатие из различных частей грунтовых массивов (табл. 1).

Как видно из таблицы, в разрезах карбонатных массивов снизу вверх, по мере увеличения интенсивности трещиноватости, происходит последовательное ухудшение механических свойств пород. Прочные ($R_{сж} = 120-50$ МПа) известняки переходят сначала в группу скальных пород средней прочности ($R_{сж} = 15-50$ МПа), а затем в группу скальных малопрочных грунтов ($R_{сж} = 5-15$ МПа) [1].

Таблица 1.

Сопротивления водонасыщенных грунтов на одноосное сжатие (R_c) из различных частей карбонатных массивов по районам Татарстана			
Район РТ (количество карьеров)	Средние значения R_c, МПа		
	Слой 1 массивный слабо измененный известняк	Слой 2 трещиноватый известняк подошвы структурного элювия	Слой 3 трещиноватый известняк кровли структурного элювия
Нижнекамский район (6 кар.)	65,3	35,2	18,1
Альметьевский район (6 кар.)	66,5	30,5	12,0
Бавлинский район (6 кар.)	68,1	29,2	18,7
Бугульминский район (6 кар.)	55,6	27,5	14,2
Черемшанский район (3 кар.)	65,9	32,0	12,4
Лениногорский район (5 кар.)	44,57	27,1	8,2

Подобная закономерность обусловлена снижением сил межзерновых структурных связей в породах по мере возрастания расклинивающего воздействия капиллярно-порowych вод [4] с увеличением трещинной водопроницаемости карбонатных массивов. Информация о среднем расстоянии между трещинами в стенках карьеров позволяет определить коэффициент структурного ослабления k_c для расчета прочности породных массивов по $R_{сж}^M$ формуле [5]:

$$R_{сж}^M = k_c * R_{сж}^o,$$

где $R_{сж}^o$ – прочность ненарушенной породы.

Согласно расчетам, слабо измененные карбонатные породы в грунтовом массиве ниже зоны развития молодых кор выветривания характеризуются прочностью сопоставимой с прочностью

образцов ненарушенной породы, 45,37-59,85 МПа. В области развития структурного элювия прочность карбонатных массивов уменьшается. В подошве слоя структурного элювия прочность породного массива составляет от 16,26 до 21,12 МПа, в кровле - от 3,28 до 7,27 МПа.

Отложения зоны бесструктурного элювия молодых кор выветривания можно отнести к классу дисперсных несвязных грунтов. Согласно результатам гранулометрического анализа в их составе преобладают дресвяно-щебнистые обломки карбонатных пород размером более 2,0 мм, сумма которых составляет 70-80% (табл. 2). Доля заполнителя псаммитовой и алевритовой фракций варьирует от 20 до 30%. Согласно ГОСТ 25100-2020 [1] породы зоны бесструктурного элювия относятся к дресвяно-щебнистым разновидностям крупнообломочных грунтов. По гранулометрическому составу грунты неоднородные ($C_u > 3$), по степени влажности - малой степени насыщения ($0 < S_r < 0,5$ д.е), в дождливый сезон - средней степени насыщения ($0,5 < S_r < 0,8$ д.е). Обломки карбонатных пород характеризуются ослабленными структурными связями, что обуславливает их относительно небольшую прочность на одноосное сжатие ($R_{сж} = 5-10$ МПа). В верхней части зоны бесструктурного элювия плитчатые фрагменты коренных пород легко ломаются руками при незначительном усилии.

Таким образом, монолитные карбонатные массивы в зоне развития молодых кор выветривания подвергаются процессам дезинтеграции, в результате чего формируется неоднородный по строению и свойствам вертикальный профиль. В пределах профиля выветривания можно выделить два инженерно-геологических элемента: структурный элювий и бесструктурный элювий. Слой структурного элювия характеризуется упорядоченной трещиноватостью за счет преимущественного развития трех систем трещин разгрузки, разбивающих грунтовый массив на блочные и плитчатые отдельности. Слой бесструктурного элювия характеризуется развитием хаотичной трещиноватости, разбивающей массив на оскольчатые фрагменты щебнистой и дресвяной размерности. С точки зрения геомеханики нижнюю часть профиля коры выветривания следует оценивать как трещиновато-блочную среду, верхнюю - как трещинно-пористую среду, в которой обломки карбонатных пород выполняют функцию «зерен», заполнитель в виде карбонатной муки - функцию цемента, а трещины - роль извилистых пор. Подобное деление подразумевает различную деформационную устойчивость пород к внешним нагрузкам и геодинамическим процессам (карст, суффозия, уплотнение).

<i>Таблица 2.</i>									
Фракционный состав грунтов бесструктурного элювия в карьерах, расположенных в различных районах Татарстана									
Местоположение карьера	Части карбонатного массива	Содержание обломочных частиц во фракциях, %							
		<10,0	10,0-5,0	5,0-2,0	2,0-1,0	1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,1
Лениногорский район	Слой 3	11,5	20,9	24,4	14,9	10,8	9,0	5,4	3,1
	Слой 2	39,9	11,6	28,5	3,2	10,6	2,4	3,1	0,7
Нижнекамский район	Слой 3	1,0	7,0	23,3	26,4	18,1	8,7	7,2	8,3
	Слой 2	23,0	28,2	20,9	7,5	7,8	2,0	9,8	0,8
Бавлинский район	Слой 3	25,4	11,5	11,8	9,2	8,8	7,9	12,6	12,9
	Слой 2	53,7	29,5	12,7	1,2	1,0	0,4	1,0	0,6
Бугульминский район	Слой 3	18,8	11,9	14,6	11,8	11,8	7,8	13,0	10,4
	Слой 2	48,4	26,1	17,6	1,8	2,3	1,0	1,8	1,1
Альметьевский район	Слой 3	25,2	8,8	13,8	18,4	14,2	12,5	3,8	3,3
	Слой 2	38,5	18,9	23,6	5,1	5,2	2,8	3,8	2,3
Черемшанский район	Слой 3	8,9	12,0	28,2	15,3	17,8	8,4	6,7	2,7
	Слой 2	41,7	15,8	10,2	6,0	8,1	4,6	7,5	6,3

*слой 2 – трещиноватый известняк подошвы структурного элювия; слой 3 – трещиноватый известняк кровли структурного элювия

Литература

1. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация.
2. Клубов В.А., Мецгеряков Ю.А. Использование геолого-геоморфологических методов при комплексных поисках нефтяных месторождений на платформе // Геология нефти и газа. 1957. №8, с. 18-28.
3. Мочалов А.М., Кагермазова С.В., Гребенцекова Г.А. Учет влияния трещиноватости скальных и полускальных пород на прочность массива при оценке устойчивости бортов карьеров по данным разведки // Записки горного института. 2011. Т. 190, с. 304-309.
4. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Грунтоведение. 2013. №2, с.3-34.
5. СП 91.13330.2012 Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП II-94-80.
6. Чернова И.Ю., Нургалиев Д.К., Нургалиева Н.Г., Нугманов И.И., Чернова О.С., Кадыров Р.И. Реконструкция истории Татарского свода в неоген-четвертичный период по данным морфометрического анализа // Нефтяное хозяйство. 2013. №6, с.12-15.
7. Черняховский А.Г. Элювий и продукты его переотложения. М., Наука, 1966.
8. Newstadt L.I. Methods of geological researching fracturing rock at engineering-geological research. Moscow - Leningrad, 1957.

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ЧЕРТЫ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БРУСИТА

И.О. Лымарь, С.А. Корчак, А.О. Михайлова

Уральский государственный горный университет

В последние годы интерес к минералу брусит постоянно растет, в связи с его широким использованием в металлургии, стекольной, химической и энергетической промышленности, а также при очистке нефтепродуктов и водоочистке.

Генезис месторождений брусита характеризуется весьма обширным разнообразием и имеет формационный характер, определяющий геологическую позицию месторождений. Среди них главнейшими можно выделить формации апомагнезитовых бруситов контактового происхождения, аподоломитовых и апогипербазитовых метаморфогенных бруситовых руд.

Формирование наиболее крупных в России месторождений брусита связано с преобразованием магнезитсодержащих пород в ходе контактового типа метаморфизма, при котором происходит активная декарбонатизация доломита и магнезита. Как правило, в месторождениях данного типа рудные тела приурочены к контактовым ореолам и имеют линзовидную или жильную формы мощностью до первых десятков метров.

Брусит как горная порода довольно редко встречается в достаточных для отработки месторождений объемах, что обуславливает слабую изученность его физико-механических свойств. Однако, в связи с активным освоением месторождений твердых полезных ископаемых, к которым относятся и месторождения брусита, возникает острая необходимость пополнения информативной базы о инженерно-геологических условиях месторождений данного типа. В представленной статье особенности физико-механических свойств брусита рассмотрены на примере Савкинского месторождения.

Брусит (Рис. 1) – мономинеральная горная порода метасоматического происхождения - является гидроксидом магния $Mg(OH)_2$ с примесями форстерита, доломита и магнезита.



Рис. 1. Фотография брусита в керне скважины.

Несмотря на простоту минерального состава, брусит характеризуется разнообразием структурно-текстурного строения. П.П. Смолиным установлено, что качественный состав бруситов в большей степени зависит от характера вторичных изменений и не имеют апопериклазового генезиса. Макроскопически выделяются массивная, полосчатая и реже брекчиевидная текстуры, структура брусита может быть от скрытокристаллической до мелкозернистой. В шлифах просматриваются сфероволокнистые (Рис. 2), черепично-волоконистые (Рис. 3) и колломорфноволокнистые текстуры (Рис. 4).

Сфероволокнистая текстура брусита представляет собой ориентированное, однонаправленное расположение зерен радиально-концентрического строения. Зерна плоские, размером от 0,2 до 0,5 мм, имеют совершенную спайность в одном направлении.

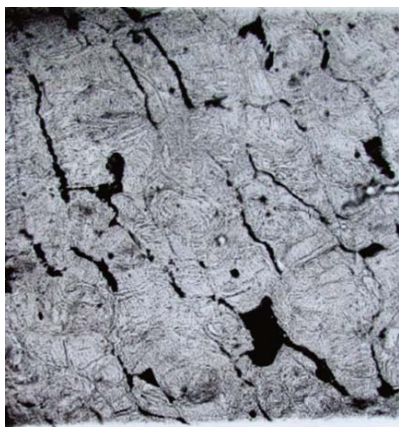


Рис. 2. Сферо-волокнистый брусит.



Рис. 3. Черепично-волокнистый брусит.

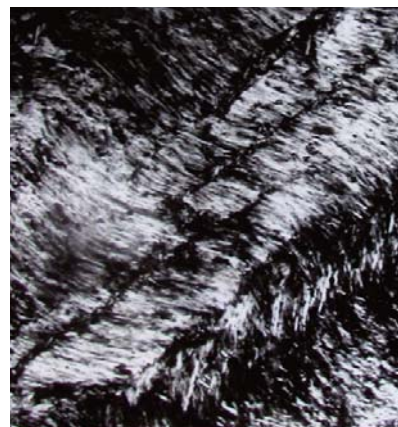


Рис. 4. Колломорфноволокнистый брусит.

Черепично-волокнистая текстура брусита схожа с брекчиевидной. Здесь зерна минерала распределены по основной массе неравномерно и имеют таблитчатую, реже листоватую форму. Строение зерен чешуйчатое, однородно ориентированное.

В волокнисто-полосчатых или колломорфноволокнистых разностях полосчатость крайне невыдержанная и обрывочная, унаследованная от резко деформированного псевдоморфного агрегата. Имеется некоторое общее направление, по отношению к которому под острыми углами ориентированы обрывочные поперечно- и косоволокнистые полосчатые обособления волокнистого брусита.

В ходе лабораторных испытаний и анализа шлифов образцов установлена закономерность изменения физико-механических свойств пород от их структурно-текстурных характеристик и вторичных изменений. Таким образом, по показателям физико-механических свойств были выделены малопрочные и среднепрочные бруситы.

Малопрочные бруситы имеют волокнисто-полосчатое строение и характеризуются прочностью на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии от 7,9 до 14,7 МПа, при среднем значении 11,2 МПа. Малопрочные бруситы относятся к зонам контактов с интрузивами и зонам интенсивной серпентинизации и скарнирования.

К средней прочности относятся бруситы сферо-волокнистого и черепично-волокнистого строения, не претерпевшие автодеформирования, а также девейлитизированные разности брусита.

Девейлитизированный брусит встречается в зонах влияния гипергенеза, в меньшей степени в трещиноватых бруситах. Такая разновидность брусита имеет бордовый или рыжевато-коричневый цвет. Девейлит образует включения изометричных зерен, гнезд, линз.

Бруситы средней прочности разделяются на размягчаемые и неразмягчаемые. Размягчаемые бруситы с средним значением коэффициента размягчаемости 0,63 имеют прочность на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии от 17,2 до 45,7 МПа, при среднем значении 24,9 МПа.

Примечательной особенностью бруситов, несмотря на довольно низкое значение твердости – 2,5-3 по шкале Мооса, являются довольно высокие значения коэффициента крепости, которые позволяют относить породу к крепким. Эта особенность вызвана высокими значениями прочности в сухом состоянии, однако после водонасыщения потеря прочности составляет 25-65% (Рис. 5).

Также установлена прямая зависимость потери прочности при водонасыщении от водопоглощения грунтов. Наиболее высокие значения водопоглощения присущи малопрочным бруситам (от 0,36 до 6,58, при среднем значении 1,82), а с увеличением прочности показатели коэффициента водопоглощения падают до 1,13 для размягчаемых и 1,01 для неразмягчаемых бруситов средней прочности. Высокие значения водопоглощения обусловлены микротрещиноватостью и пористостью бруситов, возникающих при автодеформациях в приконтактных зонах, зонах скарнирования и серпентинизации (Рис. 6).

Таким образом, установлено, что структурно-текстурные особенности брусита обуславливают его физико-механические свойства. Вторично измененные разности брусита наиболее автодеформированы, в связи с чем возрастают его гидрофильные свойства и снижаются показатели прочностных свойств. Важной особенностью необходимо выделить высокий процент потери прочности (до 65%) при водонасыщении, который не коррелируется с значениями коэффициента крепости, по которому брусит относится к крепким породам.

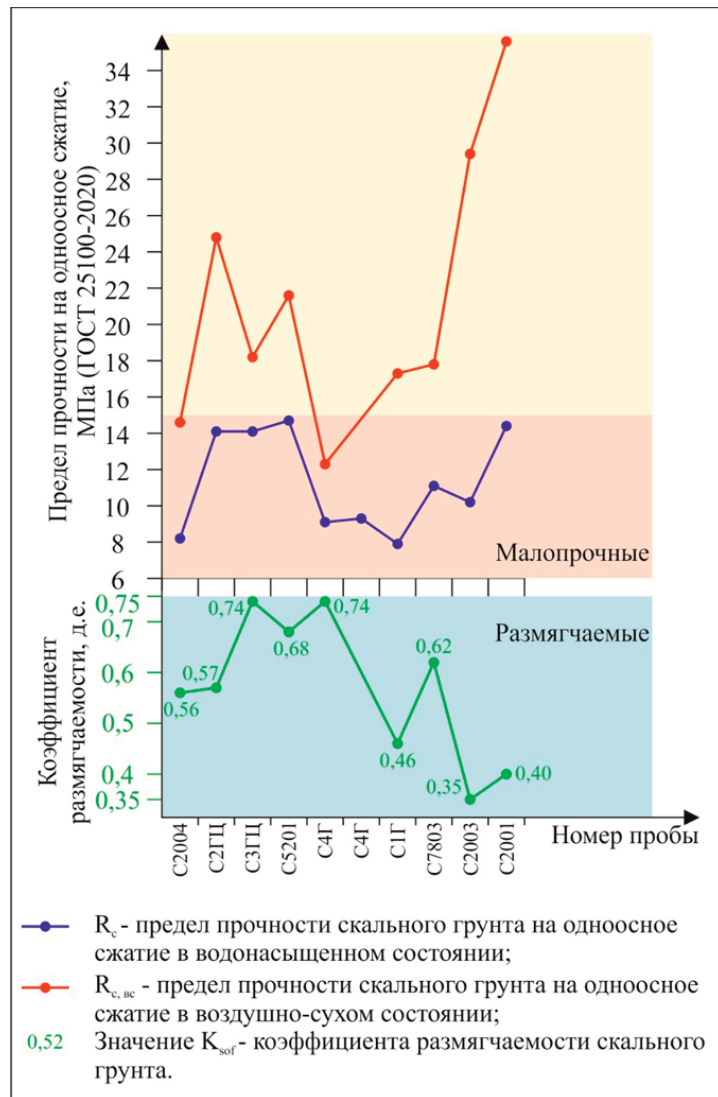


Рис. 5. Прочность пород на одноосное сжатие на примере класса малопрочного брусита.



Рис. 6. Серпентинизированный брусит.

Литература

1. Абатурова И.В., Афанасиади Э.И. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых. Екатеринбург: изд-во Уральского государственного горного университета, 2009.
2. Голодковская Г.А. Инженерно-геологические исследования при разведке месторождений полезных ископаемых. М., МГУ, 1979.

ГРУНТОВЫЕ ТОЛЩИ ХАРАСАВЭЙСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАК ОБЪЕКТ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ХРАНИЛИЩ БУРОВЫХ ОТХОДОВ

А.С. Мосина

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: mosina.a.s@yandex.ru

Введение

В результате активного освоения нефтяных и газовых месторождений территории Крайнего Севера образуется большой объем буровых отходов. Их утилизация является актуальной проблемой для нефтепользователей. Одним из способов ее разрешения выступает захоронение буровых отходов в подземные резервуары, сооружаемые в многолетнемерзлых песчаных грунтах. Их строительство ведется с поверхности через скважину, по которой в массив мерзлых песчаных грунтов подается теплоноситель. В результате водно-теплового воздействия разрушаются структурные связи в мерзлых грунтах, оттаявший грунт опускается на дно образованной выработки откуда его с помощью эрлифта поднимают на земную поверхность в гидроотвал (Рис. 1). Сформированную выработку используют как подземный резервуар для конечного размещения буровых отходов, которые с течением времени промерзают за счет теплового взаимодействия с многолетнемерзлыми породами (ММП) [1].

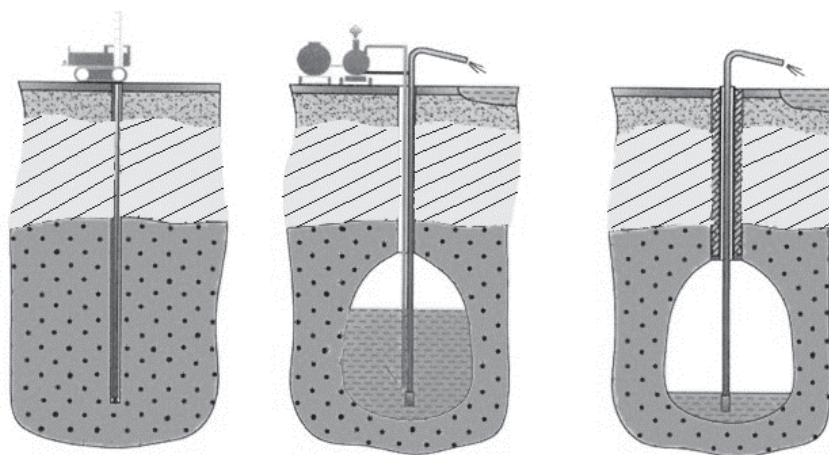


Рис. 1. Строительство подземного резервуара в мерзлой грунтовой толще.

Метод строительства и эксплуатации подземных резервуаров в ММП имеет ряд преимуществ. Во-первых, строительство и эксплуатация подобных резервуаров имеет более низкую стоимость по сравнению с другими методами обращения с отходами (строительство обезвреживающих заводов, гидроразрыв пласта, перевод в состояние геля и др.). Во-вторых, при использовании данной технологии оказывается меньшее техногенное воздействие на окружающую среду (в сравнении с захоронением на поверхности, использованием технологии гидроразрыва пласта и др.) [1].

Однако применимость данной геотехнологии имеет высокую зависимость от инженерно-геологических условий района строительства [4,5]. Так, например, строительство и эксплуатацию подземных резервуаров не ведут в мерзлых глинистых грунтах, которые плохо поддаются размыву; наличие в мерзлой грунтовой толще высокоминерализованных вод делает невозможным создание в ней подземного резервуара. В результате этих и других ограничений возникает необходимость в поиске благоприятных для реализации данной геотехнологии мерзлых грунтовых толщ.

Принципы типизации грунтовых толщ Харасавэйского месторождения

Поиск благоприятных грунтовых толщ необходимо начинать с выделения их границ. Для понимания принципа их выделения обратимся к понятию грунтовой толщи. Грунтовая толща – это

толща горных пород и почв, слагающая верхнюю часть разреза разных геоморфологических элементов и находящаяся сейчас или в будущем в сфере влияния различных инженерных сооружений [7]. Из определения ясно, что границы грунтовой толщи относительно и зависят от типа сооружения и оказываемого им воздействия. Таким образом, для выделения границ грунтовых толщ необходимо оценить влияние от сооружаемых подземных резервуаров для захоронения буровых отходов.

Верхняя граница грунтовой толщи соответствует земной поверхности, так как строительство подземных резервуаров производят с поверхности, которую предварительно отсыпают мощным слоем песка. Нижняя граница грунтовой толщи (или мощность грунтовой толщи) будет зависеть от глубины влияния подземного резервуара ниже его днища. Можно выделить два типа такого влияния: а) изменение напряженно-деформированного состояния толщи в результате формирования незакрепленной выработки; б) тепловое воздействие захораниваемых буровых отходов. Для определения нижней границы грунтовой толщи проведено изучение данных типов влияния путем численных расчетов. По результатам расчетов выявлено, что глубина влияния от сооружения подземных резервуаров в условиях Харасавэйского месторождения составляет около 70 м, причем больший вклад в ее величину оказывает тепловое влияние от захораниваемых буровых отходов.

Для поиска благоприятных для строительства подземных резервуаров грунтовых толщ проведена их типизация на основании анализа их состава, строения, свойств и состояния по данным 30 скважин, пробуренных на территории всего Харасавэйского месторождения в разные годы (1981 – 2015 гг.) разными организациями (ВНИИГАЗ, Мингазпром СССР, ООО Научно-техническая фирма «Криос» и др.) [2]. При разработке настоящей типизации грунтовых толщ за основу взят подход, предложенный В.Т. Трофимовым и соавторами при систематике грунтовых толщ Западно-Сибирской плиты [7]. Использовано построение двухрядного, перекрестного типа (таблицы-матрицы).

Для систематизации грунтовых толщ Харасавэйского месторождения были приняты две группы признаков, отражающие состав, строение и современное состояние грунтовых толщ. Использовались такие показатели состава, строения и состояния, которые оказывают наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние многолетнемерзлой грунтовой толщи. Таким образом, в первую группу признаков вошли показатели состава и строения грунтовых толщ, к которым относятся: количество и сочетание классов и типов грунтов, содержание водорастворимых солей в разрезе толщи. Во вторую группу признаков вошли особенности состояния грунтовой толщи, характеризующиеся фазовым состоянием воды в грунтах, среднегодовой температурой и степенью льдистости (увлажненности) грунтов толщ.

Типизация грунтовых толщ территории Харасавэйского газоконденсатного месторождения по первой группе признаков

Типизация грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам первой группы выполнена в пять структурных уровней.

На первом и втором структурных уровнях в качестве признаков типизации выступает число и характер классов грунтов, слагающих толщу. Грунтовые толщи изучаемой территории сложены одним классом грунтов и представлены мерзлыми дисперсными грунтами.

На третьем и четвертом структурных уровнях в качестве признаков типизации выступали число слоев и литологический тип пород, слагающих грунтовые толщи. До исследуемой глубины выделены две разновидности пород: песчаные (пески различной крупности) и глинистые (глины, суглинки и супеси). На третьем и четвертом структурных уровнях систематизация производилась путем оценки процентного соотношения разновидности пород в толще. Так, толща называлась однопородной если более 96% ее мощности сложено глинистой породой. Двухпородная толща - толща не менее 96% мощности которой сложено песчаными и глинистыми породами. Дальнейшее подразделение двухпородных грунтовых толщ по процентному содержанию литологических типов пород основано: на детальном анализе литологического строения грунтовых толщ Харасавэйского месторождения; конструктивных особенностях подземных резервуаров; требованиях к геологическому строению используемого под строительство песчаного пласта. Ниже приведены выделенные типы двухпородных грунтовых толщ.

По наличию и мощности песчаного пласта двухпородные грунтовые толщи были подразделены на: преимущественно глинистые (а), глинистые с песчаным слоем (б), песчано-глинистые с песчаным слоем (в), глинисто-песчаные с песчаным слоем (г). Степень благоприятности грунтовой толщи возрастает в ряду а-б-в-г.

Преимущественно глинистые грунтовые толщи (а) не содержат песчаный слой мощностью более 10 м и представлены от 96% до 85% глинистым грунтом. Такая грунтовая толща не является благоприятной для строительства ввиду малой мощности песчаного пласта.

Преимущественно глинистые грунтовые толщи (б) с песчаным слоем содержат слой песка более 10 м и являются благоприятными для строительства резервуаров, процентное содержание глинистой составляющей здесь составляет от 70% до 85%.

Песчано-глинистые (в) и глинисто-песчаные (г) грунтовые толщи с песчаным слоем содержат песчаный слой значительной мощности и являются весьма благоприятными для сооружения подземных резервуаров. Так, песчано-глинистые грунтовые толщи с песчаным слоем (в) представлены от 70% до 50% глинистой породой, а глинисто-песчаные грунтовые толщи (г) сложены глинистой породой менее чем на 50%.

Далее выделенные выше двухпородные грунтовые толщи с песчаным слоем подразделены с учетом глубины расположения этого слоя. Это необходимо было учесть в типизации, так как сооружение подземных резервуаров должно производиться на глубине не менее 15 м от земной поверхности. Выделены следующие двухпородные грунтовые толщи

- с песчаным слоем в верхней части (подошва песчаного пласта находится на глубине менее 25 м);
- с песчаным слоем в нижней части (подошва песчаного пласта находится на глубине более 25 м).

Соответственно при расположении песчаного слоя в верхней части - грунтовая толща является неблагоприятной для сооружения резервуара и, напротив, при расположении в нижней части – благоприятной.

Вышеприведенную типизацию грунтовых толщ по количеству и сочетанию классов и литологических типов пород (по 1-4 структурным уровням) можно представить в виде схемы (Рис. 2).

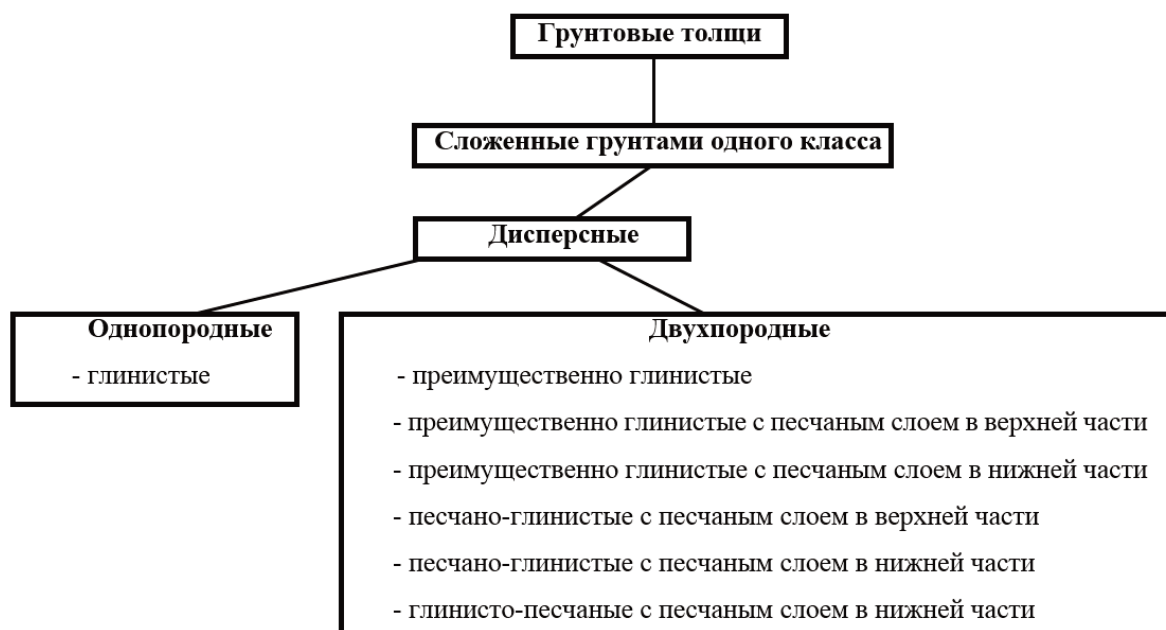


Рис. 2. Схема типизации грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам первой группы.

На пятом структурном уровне в качестве признака типизации выступает содержание водорастворимых солей (засоленность) в составе пород грунтовой толщи. При систематизации использовалась классификация грунтов по степени засоленности, представленная в ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация, таблице Б.28. Структуризация толщ произведена путем расчета процентного содержания грунтов с разной засоленностью в грунтовой толще. Таким образом, по степени засоленности выделено три типа грунтовых толщ Харасавэйского месторождения:

- преимущественно сильнозасоленные;
- слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных;
- переслаивание средне- и сильнозасоленных.

Типизация грунтовых толщ территории Харасавэйского газоконденсатного месторождения по второй группе признаков

Подразделение грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам второй группы отражает особенности их состояния, температуры грунтов и степени льдистости (увлажненности). Систематизация грунтовых толщ по признакам второй группы произведена в четыре структурных уровня.

На первом и втором структурных уровнях за классификационные признаки приняты степень однородности состояния и характер состояния грунтов толщи соответственно. Грунтовые толщи изучаемой территории подразделены на толщи с однородным состоянием по разрезу, представленные на всю мощность многолетнемерзлыми породами и с неоднородным состоянием по разрезу, представленные многолетнемерзлыми и тальми грунтами. Последний тип характеризуется присутствием в разрезе толщи сильнозасоленных подземных вод (криопэггов), наличие которых препятствует строительству и эксплуатации подземных резервуаров, поэтому такие толщи являются неблагоприятными.

На третьем и четвертом структурных уровнях признаками типизации выступают температура на глубине грунтовой толщи и степень льдистости (увлажненности) грунтов толщи. По температуре грунтовые толщи подразделены на толщи с температурой ниже минус 5°C (включительно) и грунтовые толщи с температурой минус 4-5°C. Грунтовые толщи с многолетнемерзлыми и тальми грунтами включены в одну категорию – с температурой ниже минус 5°C. По степени льдистости (увлажненности) грунтовые толщи систематизированы путем расчета процентного содержания грунтов с разной льдистостью. При этом использовалась классификация грунтов по степени льдистости, представленная в ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация, таблицы Б.26, Б.27. При наличии пластового льда грунтовая толща относилась к отдельному типу путем прибавления характеристики “с включением сильнольдистых”. Грунтовые толщи с неоднородным состоянием по разрезу многолетнемерзлые и тальные относились к одному типу с добавлением слов “с включением сильноувлажненных”. Типизация грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам второй группы показана на рис. 3.

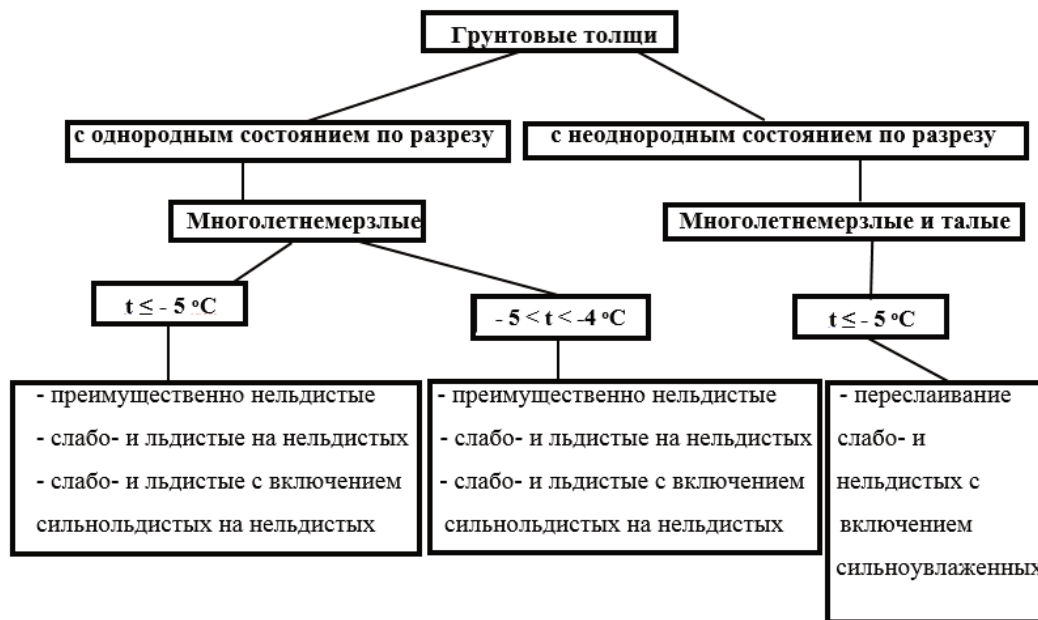


Рис. 3. Схема типизации грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам второй группы.

Общая систематика грунтовых толщ Харасавэйского газоконденсатного месторождения

Представленные выше две типизационные схемы соединены в таблицу-матрицу, которая наглядно отражает состав, строение и современное состояние грунтовых толщ Харасавэйского газоконденсатного месторождения (табл.1). В таблице-матрице для удобства восприятия приняты следующие буквенные обозначения для степени льдистости (увлажненности):

- преимущественно нельдистые – а;
- слабо- и льдистые на нельдистых – б;
- слабо- и льдистые с включением сильнольдистых на нельдистых – в;
- переслаивание слабо- и нельдистых с включением сильноувлажненных – г.

При пересечении вертикали и горизонтали таблицы-матрицы образуются таксономические единицы грунтовой толщи разного иерархического уровня, которые обладают признаками первой и второй группы одновременно. Наименьшая из них – тип грунтовой толщи, которая характеризуется определенными литологическим составом, температурой грунтов, степенью засоленности и льдистости (увлажненности). Всего выделено 133 типа грунтовых толщ, из которых на Харасавэйском месторождении действительно встречено 20 типов. Встреченные типы грунтовых толщ отмечены в табл. 1 нумерацией.

Выполненная типизация отражает все многообразие грунтовых толщ Харасавэйского месторождения с их инженерно-геологическими особенностями. Она может быть использована для оценки благоприятности того или иного типа грунтовой толщи для строительства и эксплуатации подземных резервуаров. Исходя из требований к составу, строению и состоянию грунтов для создания хранилищ, грунтовые толщи были подразделены по уровню благоприятности – в табл. 1 неблагоприятные толщи отмечены серым цветом, благоприятные выделены белым цветом.

Грунтовые толщи с неблагоприятными условиями для сооружения подземных резервуаров в ММП обладают следующими характеристиками:

- (1) отсутствует песчаный пласт мощностью более 10 м;
- (2) песчаный пласт расположен на глубине менее 15 м от земной поверхности, что способствует влиянию сезонных колебаний температуры на построенный и эксплуатируемый резервуар;
- (3) грунты толщи являются нельдистыми, что способствует фильтрации хранимого продукта в массив породы;
- (4) толщина имеет неоднородное состояние по разрезу, присутствуют сильноувлажненные грунты [1, 6].

Всего на исследуемой территории Харасавэйского месторождения встречено 13 типов грунтовых толщ с неблагоприятными условиями для строительства и эксплуатации подземных резервуаров (в таблице они отмечены нумерацией в ячейках серого цвета). Пример грунтовой толщи №7 (табл. 1) с неблагоприятными условиями представлен на Рис. 4.

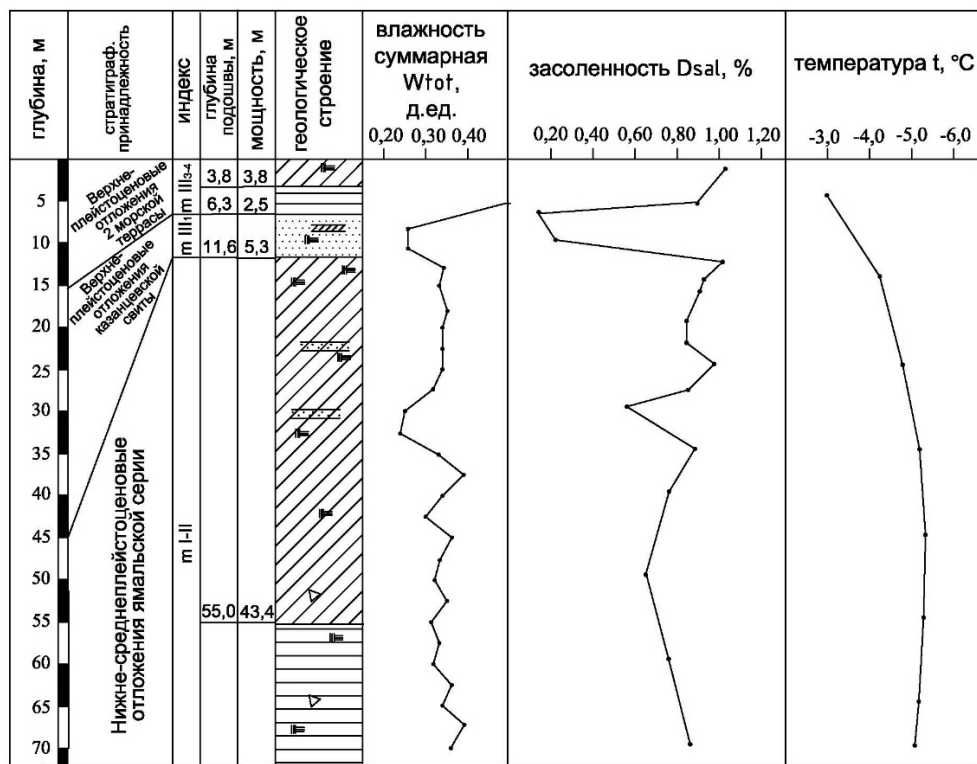


Рис 4. Грунтовая толща № 7 с неблагоприятными условиями под строительство и эксплуатацию подземных резервуаров для захоронения буровых отходов.

Таблица 1.

Типизация грунтовых толщ по благоприятности строительства и эксплуатации подземных резервуаров для хранения отходов бурения

Грунтовые толщи		с однородным состоянием по разрезу			с неоднородным состоянием по разрезу								
		ММП						ММП и талые					
		$t \leq -5^{\circ}\text{C}$			$-5 < t < -4^{\circ}\text{C}$			$t \leq -5^{\circ}\text{C}$					
		а	б	в	а	б	в	г					
Сложенные грунтами одного класса	Дисперсные	Однородные	глинистые	сильнозасоленные		1							
				слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных				2					
				переслаивание средне- и сильнозасоленных	3	4							
		Двухпородные	преимущественно глинистые	сильнозасоленные									
				слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных				5	6				
				переслаивание средне- и сильнозасоленных	7	8	9						
			преимущественно глинистые с песчаным слоем в верхней части	сильнозасоленные									10
				слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных	11	12							
				переслаивание средне- и сильнозасоленных									
			преимущественно глинистые с песчаным слоем в нижней части	сильнозасоленные									
				слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных		13	14						
				переслаивание средне- и сильнозасоленных									
		песчано-глинистые с песчаным слоем в верхней части	сильнозасоленные									15	
			слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных										
			переслаивание средне- и сильнозасоленных										
		песчано-глинистые с песчаным слоем в нижней части	сильнозасоленные										
			слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных		16	17							
			переслаивание средне- и сильнозасоленных						18				
		глинисто-песчаные с песчаным слоем в нижней части	сильнозасоленные										
			слабо- и средnezасоленные на сильнозасоленных		19								
сильнозасоленные						20							

Грунтовые толщи являются благоприятными для строительства и эксплуатации подземных резервуаров, если не обладают вышеперечисленными характеристикам: (1), (2), (3) и (4).

Всего выделено 7 типов грунтовых толщ Харасавэйского месторождения с благоприятными условиями для строительства и эксплуатации подземных резервуаров. В табл. 1 типы грунтовых толщ с благоприятными условиями выделены белым цветом и отмечены нумерацией. Пример грунтовой толщи с благоприятными условиями №16 (табл. 1) представлен на Рис. 5.

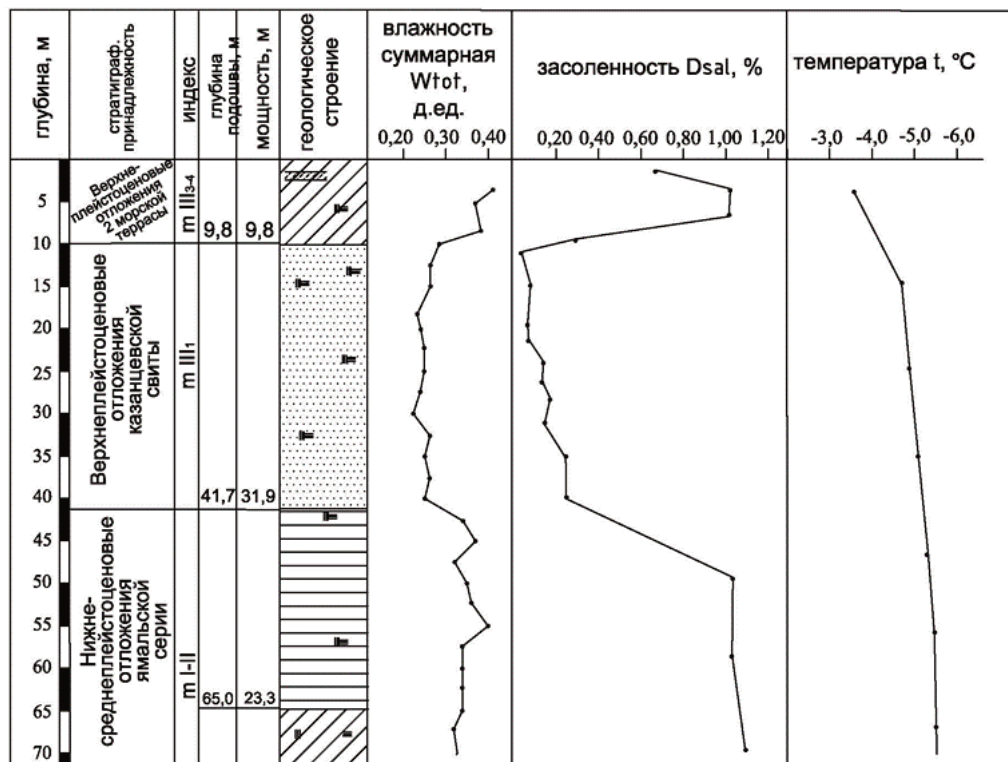


Рис. 5. Грунтовая толща № 16 с благоприятными условиями под строительство и эксплуатацию подземных резервуаров для захоронения буровых отходов.

Подразделение типов грунтовых толщ по благоприятности позволяет предварительно оценить возможность сооружения в них подземных резервуаров. Данный подход может быть использован для оценки благоприятности мерзлых грунтовых толщ для строительства и эксплуатации подземных резервуаров на территории других месторождений.

Однако напряженно-деформированное состояние (НДС) разных типов грунтовых толщ с благоприятными условиями будет отличаться. Это логично объясняется различием показателей их физико-механических, в том числе и реологических свойств. Поэтому для более детального прогноза надежного функционирования подземных резервуаров необходимо в дальнейшем провести численное моделирование НДС грунтовых толщ. Это позволит описать поведение выделенных на первом этапе благоприятных грунтовых толщ под воздействием строительства и эксплуатации подземных резервуаров.

Благодарности. Автор выражает благодарность Трофимову В.Т., Аверкиной Т.И., Бадю Ю.Б., Николаевой С.К. за замечания, ценные советы и предложения, предоставленные материалы при подготовки настоящей работы.

Литература

1. Аксютин О.Е., Казарян В.А., Иииков А.Г., Хлопцов В.Г., Теплов М.К., Хрулев А.С., Савич О.И., Сурин С.Д. Строительство и эксплуатация резервуаров в многолетнемерзлых осадочных породах. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013
2. Бадю Ю.Б. Геологическое строение криогенной толщи севера Западной Сибири// Инженерная геология. 2011. N 2, с. 40-55.

3. Мосина А.С., Мирный А.Ю., Скворцов А.А., Сурин С.Д. Методика оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. N 3-1, с. 223-237.
4. Мосина А.С., Николаева С.К., Скворцов А.А. Прогноз изменения состояния многолетнемерзлой грунтовой толщи под влиянием строительства и эксплуатации подземных резервуаров для захоронения отходов бурения в условиях Крайнего Севера (на примере среднего Ямала)// Инженерная геология. 2020. Том XV. N 2, с. 68-81
5. Сурин С.Д., Мосина А.С. Методика формообразования подземных резервуаров многолетнемерзлых породах// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. N 3-1, с. 252-267
6. Сурин С.Д. Обоснование тепловых режимов строительства и эксплуатации подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах. Канд. диссер. М., Московский государственный горный университет, 2013
7. Трофимов В.Т., Фирсов Н.Г., Кашиперюк П.И., Кудряшов В.Г. Грунтовые толщи Западно-Сибирской плиты. М., МГУ, 1988

ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАЗМЕЩЕНИЕ ХРАМА СВЯТОЙ ВЕЛИКОМУЧЕНИЦЫ ЕКАТЕРИНЫ (г. ЕКАТЕРИНБУРГ)

О.Н. Овечкина

ООО НИЦ «СтройГеоСреда», 620034, г.Екатеринбург, ул.Бебеля, 17.
E-mail: oon5316@mail.ru

Город Екатеринбург был назван в честь императрицы Екатерины I и покровительницы горных ремесел Святой Великомученицы Екатерины [6]. Город на реке Исети строился по лучшим образцам фортификационного искусства Германии, Нидерландов и Франции. Внутри Екатеринбургской крепости с запада на восток была воздвигнута плотина. По обе стороны плотины образованы предзаводские площади, которые имели строгое функциональное назначение: одна из них (восточная) - церковная, другая (западная) - торговая.

В пределах восточной площади была построена церковь из дерева на каменном фундаменте, названная во имя святой великомученицы Екатерины. В середине XVIII столетия деревянную церковь сменил каменный собор. В XIX веке он неоднократно перестраивался (в результате здание имело 55,5 м в длину и 40,5 м в ширину, колокольня Екатеринбургского храма была высотой около 58 м). А в 1930 году — храм упразднен и разрушен.

В 2015 г. владельцы УГМК и РМК подали идею строительства Храма святой Екатерины в бухте Городского пруда (Рис. 1), который должен был появиться к 300-летию Екатеринбургa. Сама идея строительства храма на воде принадлежит начальнику горных заводов генералу Глинка В.А. и игумену Ново-Тихвинского монастыря в конце XVIII в. [2].

Строительство зданий и сооружений в пределах города Екатеринбургa, выполняется, в основном, на элювиальных грунтах, которые являются региональным фактором инженерно-геологических условий Урала.

Полученный опыт при выполнении изысканий на элювиальных грунтах свидетельствует об определенных трудностях в обоснование выделения инженерно-геологических элементов, определении физико-механических свойств, разбросе их значений при проведении полевых опытных работ. Высокая изменчивость инженерно-геологического разреза связанная как вертикальной зональностью продуктов выветривания [7], так и с наличием тектонически нарушенных зон, по которым сформировались линейные коры, сложенные дисперсными разновидностями грунтов. Это определяется длительной и сложной историей развития региона, его структурными особенностями, избирательностью выветривания, что связано с процессом геохимического преобразования материнских горных пород.

Для Урала, а в частности для Екатеринбургa, характерно «пилообразное» залегание кровли скальных грунтов, наличие в них глубоких «карманов» выветривания, сложенных элювиальными суглинками, которые являются основанием большинства сооружений [3, 4, 5]. В таких условиях неравномерность передачи нагрузок, неоднородность залегания грунтов и повышенная их деформируемость при недостаточно эффективных проектных решениях могут привести к развитию чрезмерных осадков, прогибов и кренов фундаментных частей зданий.

В данной статье рассматриваются результаты комплексных инженерных изысканий, выполненных для изучения инженерно-геологических условий двух площадок, выбранных для строительства Храма Св. Великомученицы Екатерины в г. Екатеринбургe (Рис. 1): I участок - расположен в акватории городского пруда; II участок – в сквере у здания драматического театра

Рассмотрим особенности инженерно-геологических условий двух площадок, выбранных для строительства Храма.

I участок - расположен у юго-восточного борта новейшей денудационно-тектонической впадины Городского пруда. В Исетской денудационно-тектонической впадине протекает р. Исеть, которая пересекает город Екатеринбург с северо-запада на юго-восток по азимуту 330°. В геологическом строении принимают участие скальные грунты различного возраста, состава и свойств. Кора выветривания изучаемого участка представлена в следующем виде по классификации Л.А.

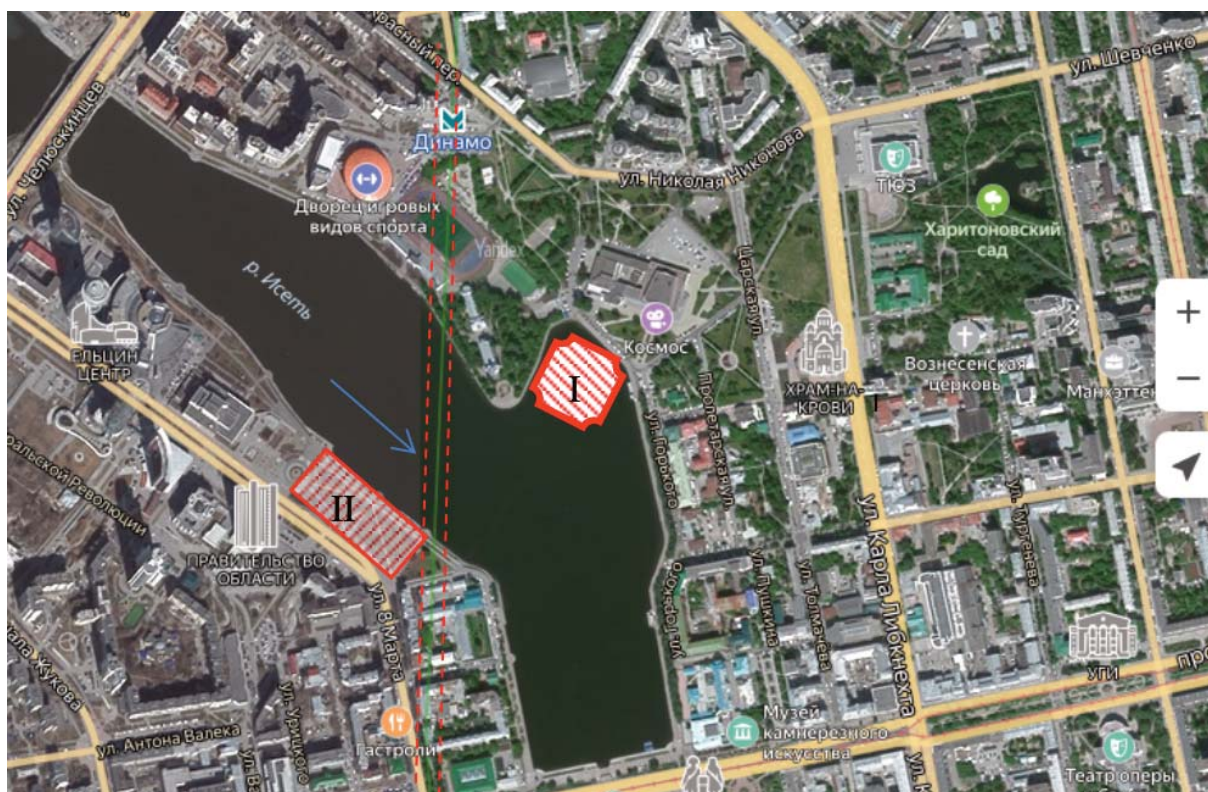


Рис. 1. Схема расположения участков строительства Храма Св. Великомученицы Екатерины.

 I участок;  II участок;  линия метрополитена.

Ярг [7]: 1) глыбовая зона (IIa), представлена скальными грунтами выветрелыми и сильновыветрелыми. Данная зона вскрыта в виде пачек или останцов на глубине 8,0-9,0 м, мощностью 2,0-10,0 м; 2) щебенистая зона (IIб) – отсутствует; 3) дисперсная зона (IV) – представлена суглинками, реже глинами, залегающими слоем большой мощности от 11,8 м до 42,0 м и более. Общая мощность коры выветривания более 42 м.

Гидрогеологические условия характеризуются распространением двух водоносных горизонтов: горизонт поровых вод аллювиальных отложений и горизонт, приуроченный к системе трещин в скальном массиве, остаточной трещиноватости элювиальных отложений коры выветривания. Оба горизонта гидравлически связаны между собой и образуют единую безнапорную поверхность. Аллювиальный водоносный горизонт безнапорного характера развит спорадически в долине р. Исеть. Непосредственно в границах участка водовмещающими грунтами являются сапропели и суглинки аллювиальные. Под воздействием дренажной системы водопонижения линии Екатеринбургского метрополитена, естественные уровни подземных вод значительно снижены. В районе станции метро «Динамо», где работает вертикальное водопонижение, состоящее из восьми дренажных скважин, динамические уровни подземных вод в центре депрессии находились на глубине 64,6 м. Сброс дренажных вод осуществляется в р. Исеть.

По химическому составу воды смешанного состава, степень минерализации равна 0,2-0,5 г/дм³, общая жесткость воды изменяется от 2,9 до 4,7 °Ж, водородный показатель 7,5-7,6. Коэффициенты фильтрации: суглинки аллювиальные – менее 0,001 м/сут.; суглинки элювиальные – 0,0004-0,5 м/сут.; скальный грунт (в зависимости от степени трещиноватости) 0,2 – 3,5 м/сут.

По величине расчетной силы сейсмического воздействия I участок располагаются на грунтах второй категории по сейсмическим свойствам по классификации СНиП II -7-81*, участками третьей и первой категорий. Величина расчетной силы сейсмического воздействия оценивается в 6 баллов по шкале MSK-64.

Геологический разрез I участка (Рис. 2) представлен следующими грунтами (сверху вниз):

1. Насыпной грунт – представлен щебнем, обломками скального грунта, обломками кирпича, осколками стекла, фрагментами металла, песком, илом. Мощность слоя изменяется от 0,3 м до 1,3 м;

2. Сапропель – донный осадок черного цвета, текучей консистенции, высокоминеральный, с высоким содержанием органического вещества. Мощность слоя 0,2-1,3 м;

3. Суглинок аллювиальный мягкопластичный - серого и коричневатого-серого цвета, с маломощными линзами песка, с глубиной с включением гравия и гальки, на отдельных участках гравелистый, с примесью торфа и среднеторфованный. Мощность составила от 0,5 до 4,1 м;

4. Суглинок аллювиальный тугопластичный - коричневого, зеленого, серовато-зеленого, коричневатого-серого цвета, с маломощными линзами песка, с глубиной с включением гравия и гальки, на отдельных участках гравелистый (по визуальному описанию), с прослоями супеси. Мощность грунтов составила 1,3-3,7 м, достигая 6,3 м в долине реки Мельковки;

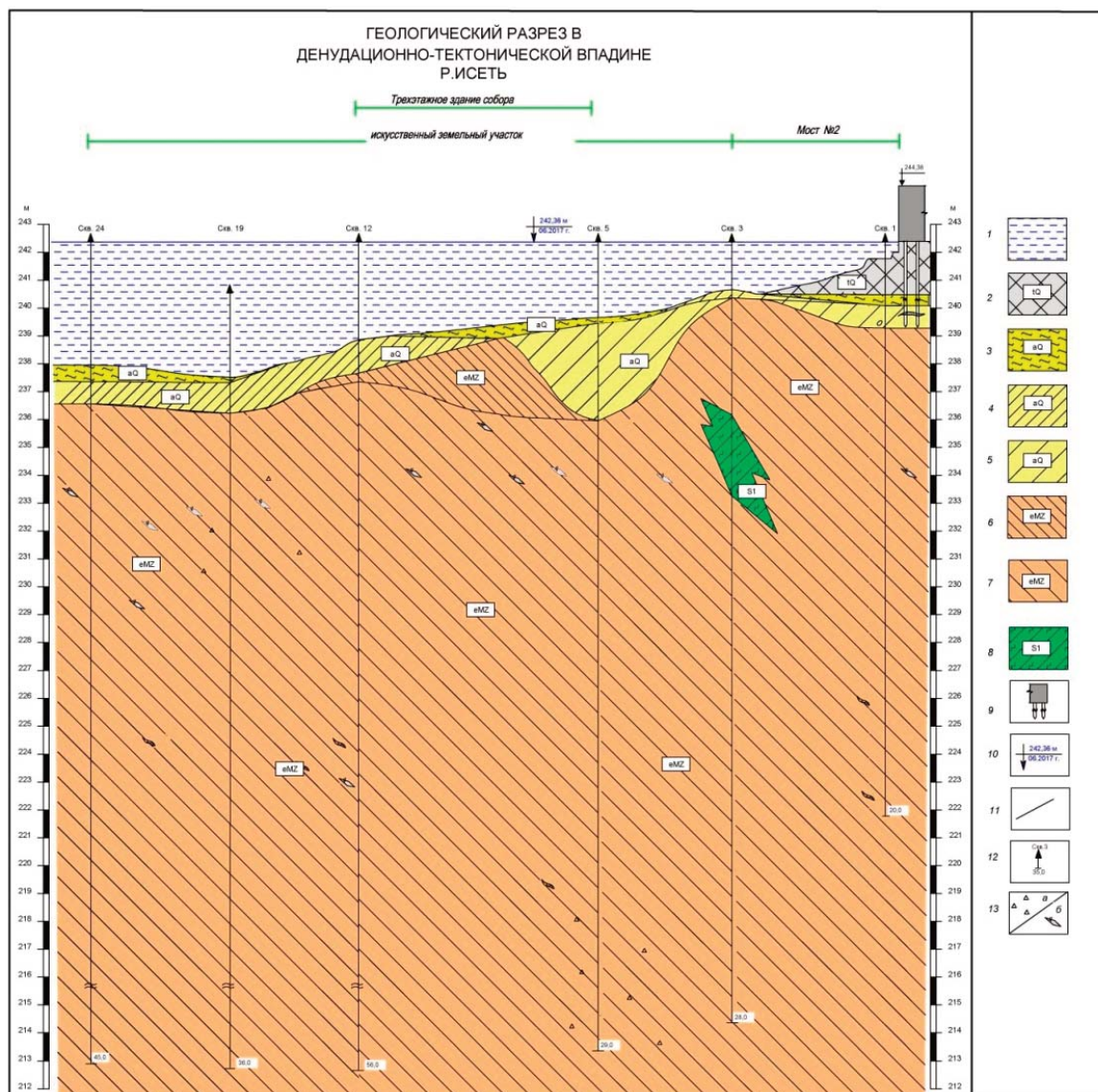


Рис. 2. Геологический разрез I участка в зоне развития денудационно-тектонической впадины реки Исети.

I-вода; 2-техногенные грунты четвертичного возраста; 3-сапропель, с высоким содержанием органического вещества; 4-суглинок аллювиальный четвертичного возраста, мягкопластичный; 5-суглинок аллювиальный четвертичного возраста; 6-суглинок элювиальный мезозойского возраста, тугопластичный; 7-суглинок элювиальный мезозойского возраста, твердый; 8-сланцы и порфиры прочные силурийского возраста; 9-существующий фундамент, свайного типа; 10-абсолютная отметка уреза воды пруда (в числителе – абс.отм, м; в знаменателе – дата замера); 11-литологические границы; 12- скважина, ее номер/глубина, м; 13а – дресва; 13б - «гнезда» полускальных грунтов.

5. Суглинок элювиальный тугопластичный – пестроцветный (коричнево-желтого, коричневого, зеленого, серого и зеленовато-коричневого цвета). Грунт залегает, в основном, в центральной и южных частях изучаемого участка мощностью от 1,5-2,0 м до 4,3 м;

6. Суглинок элювиальный твердый – пестроцветный (коричнево-желтого, коричневого, зеленого, фиолетового, красновато-фиолетового, светло-зеленого и светло-желтого цвета), по визуальному

описанию с включением дресвы и щебня, участками дресвяный (обломков до 28%), с глубиной с сохранившейся структурой коренных пород, с «гнездами» полускальных грунтов и кварца. Грунт залегает повсеместно, вскрытой мощностью от 11,8 м до 41,0 м;

7. Скальные грунты, представлены сланцами и порфиритами очень низкой и пониженной прочности, малопрочными и прочными. Грунты встречаются локально, в виде пачек или останцов, мощностью 2,0-10,0 м.

Физико-механические свойства грунтов сферы взаимодействия представлены в табл. 1, 2.

<i>Таблица 1.</i>				
Физико-механические свойства скальных грунтов (I участок)				
Значения показателей физико-механических свойств	Сланцы и порфириты			
	очень низкой прочности	пониженной прочности	малопрочные	прочные
Плотность, г/см ³	$\frac{2,10-2,29}{2,21}$ (8)	$\frac{2,17-2,28}{2,24}$ (6)	$\frac{2,29-2,45}{2,36}$ (10)	$\frac{2,60-2,67}{2,64}$ (6)
Коэффициент размягчаемости, д. ед.	0,5			
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	$\frac{0,8-1,2}{1,1}$ (6)	$\frac{2,5-4,2}{3,2}$ (6)	$\frac{5,0-7,8}{6,1}$ (15)	$\frac{48,2-97,1}{66,8}$ (6)

II участок – расположен в пределах правого коренного берега городского пруда. В геологическом строении принимают участие значительно метаморфизованные (вплоть до зеленых сланцев) образования кировградской свиты, причем метаморфизм здесь проявляется в такой большой степени в связи с контактом свиты с Балтымским габбровым массивом. Кора выветривания представлена в следующем виде по классификации Л.А. Ярг [7]: 1) трещинная зона (I), в которой материнские минералы остаются неизменными, мощность вскрытой зоны составляет 6,7-37,8 м; 2) глыбовая зона (IIa), представлена полускальными грунтами сильновыветрелыми, вскрытая мощность 0,4-7,2 м; 3) щебенистая зона (IIб) – дресвяный грунт коричневого, зелено-коричневого, серо-коричневого, зеленого и серо-зеленого цвета, с твердым суглинистым заполнителем до 48%, мощностью 0,2-8,5 м; 4) дисперсная зона (IV) – представлена элювиальными суглинками серо-зеленого цвета, твердой консистенции, с включением щебня до 20-40%. Мощность слоя 0,5 м. Общая мощность коры выветривания 30 м.

В гидрогеологическом отношении II участок, также как и I участок, расположен в пределах развития двух водоносных горизонтов – грунтового водоносного горизонта, приуроченного к четвертичным аллювиальным отложениям речной долины, и водоносного горизонта зоны трещиноватости коры выветривания вулканогенных и метаморфических пород. Аллювиальный водоносный горизонт в районе участка работ полностью перекрыт акваторией пруда. Зеркало подземных вод находилось на глубине 3,4-6,5 м.

II участок располагается в границах охранной зоны метрополитена, а воздействие дренажной системы, выражено слабо. Депрессионная воронка, сформировавшаяся в результате эксплуатации водопонизительного куста скважин, расположенного у станции метро «Динамо», не переходит на правобережную сторону Городского пруда и замыкается своей южной частью на его акваторию.

По химическому составу воды смешанного состава, степень минерализации равна 508,96-736,82 мг/дм³, общая жесткость воды изменяется от 2,5 до 4,3 °Ж, значение водородного показателя составило 6,7-7,8. Коэффициенты фильтрации: суглинки и глины аллювиальные – менее 0,001 м/сут.; суглинок элювиальный – 0,0004-0,5- м/сут.; дресвяный грунт – 1,2-2,5 м/сут; скальный грунт (в зависимости от степени трещиноватости) 0,52 – 19,31 м/сут.

По величине расчетной силы сейсмического воздействия участок проектируемого храма, расположенный на коренном берегу городского пруда располагаются на грунтах первой и второй ка-

Таблица 2.					
Физико-механические свойства дисперсных грунтов (I участок)					
Значения показателей физико-механических свойств	Аллювиальные грунты			Элювиальные грунты	
	Сапропель	Суглинок мягко-пластичный	Суглинок туго-пластичный	Суглинок туго-пластичный	Суглинок твердый
Плотность, г/см ³	1,55	$\frac{1,70-1,97}{1,81}$ (10)	$\frac{1,99-2,14}{2,05}$ (12)	$\frac{1,91-1,98}{1,94}$ (8)	$\frac{1,81-2,11}{1,96}$ (65)
Естественная влажность, д.ед.	0,793-1,732	$\frac{0,381-0,559}{0,476}$ (10)	$\frac{0,157-0,243}{0,204}$ (12)	$\frac{0,294-0,359}{0,328}$ (8)	$\frac{0,177-0,354}{0,418}$ (74)
Число пластичности	0,155-0,161	$\frac{0,080-0,162}{0,109}$ (10)	$\frac{0,085-0,154}{0,116}$ (12)	$\frac{0,097-0,144}{0,125}$ (8)	$\frac{0,083-0,181}{0,133}$ (74)
Показатель текучести, д. ед.	1,36-6,20	0,52-0,78	<0-0,45	0,28-0,48	<0-0,25
Пористость, %	65,7	$\frac{40,5-58,0}{51,0}$ (10)	$\frac{28,6-40,3}{36,1}$ (12)	$\frac{49,5-50,9}{48,6}$ (8)	$\frac{35,4-50,0}{44,8}$ (65)
Коэфф.пористости, д.ед.	1,912	$\frac{0,681-1,381}{1,072}$ (10)	$\frac{0,400-0,675}{0,568}$ (12)	$\frac{0,850-1,035}{0,949}$ (8)	$\frac{0,548-1,000}{0,817}$ (65)
Относительное содержание орг.веществ, д.ед.	0,28-0,38	0,001-0,27			
Удельное сцепление, МПа		0,016	$\frac{0,027-0,046}{0,034}$ (9)	$\frac{0,015-0,023}{0,020}$ (6)	$\frac{0,019-0,049}{0,027}$ (19)
Удельное сцепление, МПа (в стабилометрах)				0,024-0,041	$\frac{0,021-0,054}{0,038}$ (8)
Угол внутреннего трения, град.		14	21-27 23 (9)	$\frac{19-22}{21}$ (6)	$\frac{14-27}{21}$ (19)
Угол внутреннего трения, град. (в стабилометрах)				21-27	$\frac{17-32}{23}$ (8)
Компрессионный модуль деформации при ест. Влажности в инт-ле нагрузок 0,1-0,2 МПа, E, МПа		1,1-1,9	$\frac{3,2-5,1}{4,4}$ (6)	3,0-6,0	2,3-6,0
Модуль деформации в приборе трехосного сжатия, МПа				6-11	13-26
Полевой модуль деформации, МПа		3,5-10,1	5,0-17,0	3,5-14,3	6-40
Примечание: Числитель – min-max значения; знаменатель – среднее значение, в скобках указано количество определений					

тегории по сейсмическим свойствам по классификации СНиП II -7-81*. Величина расчетной силы сейсмического воздействия оценивается в 5 баллов по шкале MSK-64.

Геологический разрез II участка (Рис. 3) представлен следующими грунтами (сверху вниз):

1. Насыпной грунт – представлен почвенно-растительным слоем (привезенным при благоустройстве территории), щебнем, дрсвой, суглинком, обломками кирпича, скального грунта, бетона, дресины, металла. Грунт мерзлый до глубины 1,0 м. Грунт залегает повсеместно, с поверхности слоем мощностью 0,5-4,7 м;

2. Суглинок аллювиальный – серого цвета, различной консистенции: от полутвердых до мягкопластичных, с примесью органического вещества. Мощность аллювиальных отложений составила 1,5-1,9 м;

3. Суглинок делювиальный - суглинками бурого и буро-коричневого цвета, твердой и полутвердой консистенции. Грунт встречен слоем мощностью 0,2-0,5 м;

5. Суглинок элювиальный – серо-зеленого цвета, твердой консистенции, с включением щебня до 20-40%. Мощность 0,2-0,5 м;

6. Дресвяный грунт – коричневого, зелено-коричневого, серо-коричневого, зеленого и серо-зеленого цвета, с твердым суглинистым заполнителем до 48%. По визуальному описанию обломки от сильно- до слабыветрелых. Грунт встречен прерывистым слоем мощностью 0,2-8,5 м;

7. Скальные и полускальные грунты, представлены сланцами и порфиритами низкой и средней прочности. Грунты встречаются повсеместно, на глубине 0,8-9,0 м вскрытой мощностью 40,0 м.

По результатам геофизических исследований методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) изучен геоэлектрический разрез рассматриваемого участка, свидетельствующий о достаточно однородном, практически без особенностей, геологическом строении верхней части земной коры до глубин порядка 30 м (Рис. 3).

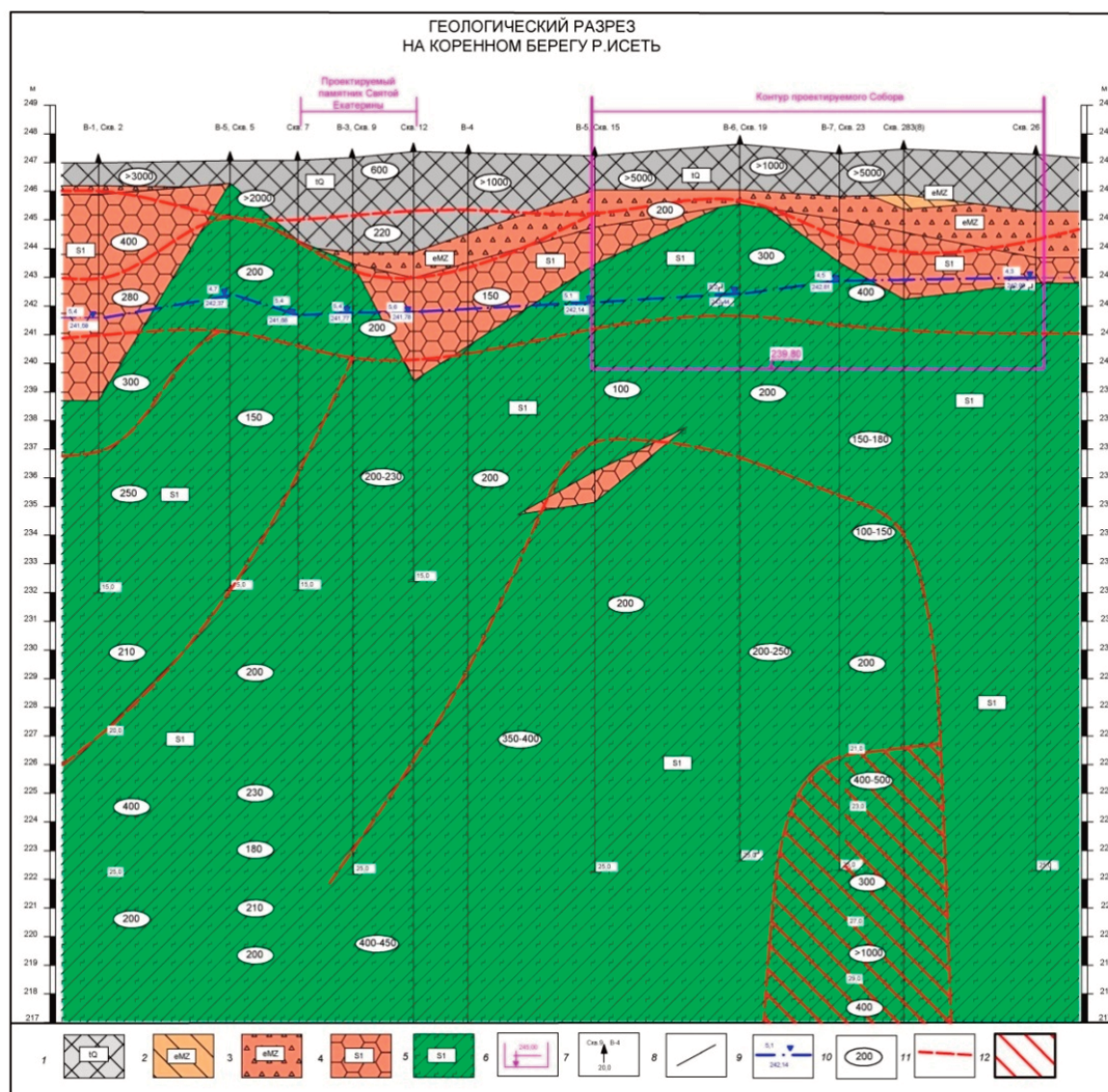


Рис. 3. Геологический разрез II участка, на коренном берегу реки Исеть.

1-техногенные грунты четвертичного возраста; 2-суглинок элювиальный мезозойского возраста; 3-дресвяный грунт мезозойского возраста; 4-Сланцы и порфириды низкой прочности силурийского возраста; 5-Сланцы и порфириды средней прочности силурийского возраста; 6-контур проектируемого собора/абс.отметка заложения фундамента, м; 7- скважина/точка ВЭЗ, ее номер/глубина, м; 8-литологические границы; 9-уровень подземных вод (в числителе – глубина, м; в знаменателе – абс.отм, м); 10 – значения удельного электрического сопротивления, Ом*м; 11 -граница геоэлектрического горизонта; 12-предполагаемая область влияния метрополитена (?) по результатам ВЭЗ.

В пределах рассматриваемого участка разрез, в целом, трехслойный. Верхний высокоомный горизонт (удельные электросопротивления 400-1500 Ом*м) до глубин 3-5 м представлен техногенными насыпными грунтами и грунтами чехла коры выветривания. В интервале от 3-5 до 15-20 м, располагается горизонт с относительно пониженными электросопротивлениями (порядка 100-200 Ом*м), предположительно обусловленный обводненными коренными породами (порфиритами) средней

прочности. Ниже глубины 15-20 м, залегают менее обводненные коренные породы (порфириды) средней прочности, с относительно повышенными (порядка 200-400 Ом*м) электросопротивлениями. Выделенные геофизиками 4 участка (в районе точек ВЭЗ № 7, №12, № 13, № 10), с аномальным повышенным или пониженным и неоднородным электросопротивлениями, обусловлены влиянием инженерных сооружений (тоннелей) метрополитена (?!).

Физико-механические свойства грунтов сферы взаимодействия II участка представлены в табл. 3 и 4.

<i>Таблица 3.</i>	
Физико-механические свойства элювиальных дресвяных грунтов (II участок)	
Значения показателей физико-механических свойств	
Плотность, г/см ³	2,26
Естественная влажность, д.ед.	$\frac{0,038-0,079}{0,062}$ (12)
Число пластичности (из заполнителя)	$\frac{0,07-0,13}{0,094}$ (12)
Показатель текучести, д.ед.	<0
Содержание частиц размером >0,5 мм, %	$\frac{40,6-99,7}{77,1}$ (12)
Содержание частиц размером >2,0 мм, %	$\frac{17,3-98,5}{63,1}$ (12)
Удельное сцепление, МПа	0,025
Угол внутреннего трения, град.	20
Полевой модуль деформации, МПа (штамп S-600 см ²)	30,1-38,4
Примечание к таблицам 3 и 4: Числитель – min-max значения; знаменатель – среднее значение, в скобках указано количество определений	

<i>Таблица 4.</i>		
Физико-механические свойства скальных грунтов (II участок)		
Значения показателей физико-механических свойств	Сланцы и порфириды	
	низкой прочности	средней прочности
Плотность, г/см ³	$\frac{2,03-2,38}{2,24}$ (6)	$\frac{2,60-3,06}{2,83}$ (49)
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	$\frac{1,8-3,4}{2,6}$ (6)	$\frac{16,9-47,1}{31,2}$ (49)
Модуль упругости (Юнга), ГПа	6,0-6,1	31,7-34,8
Коэффициент Пуассона	0,31-0,32	0,23
Модуль деформации, ГПа	0,04	7,4-14,8

По результатам изучения двух участков можно сказать, что I участок является не пригодным для строительства храма, так как большая мощность дисперсных грунтов коры выветривания (более 42 м), может привести к развитию чрезмерных осадков, прогибов и кренов фундаментных частей здания. Наличие поверхностных вод определяет сложность устройства строительных работ, возможность затопления и обрушения стенок котлована. Во время водопонижительных работ, возможно развитие суффозионного процесса и образование мульд сдвижения. При разработке котлована могут возникнуть трудности из-за присутствия в разрезе слабых грунтов (сапропелей, мягкопла-

стичных суглинков), которые характеризуются низкими значениями прочностных и деформационных свойств и подвержены тиксотропии при механическом воздействии. После восстановления уровня воды в пруду возможно развитие барражного эффекта.

II участок – является пригодным для строительства. На это влияет близкое залегание скальных грунтов к дневной поверхности (0,8-9,0 м). Негативными факторами являются подтопление и подработанность территории, за счет перегонных тоннелей метрополитена, а также возможно развитие суффозионных процессов во время строительного водопонижения, образование мульд сдвижения и осыпание стенок котлована. При долгом простаивании котлована в открытом состоянии горные породы подвержены процессу выветривания.

Храм Святой великомученицы Екатерины мог бы стать подарком не только жителям города, но и крупным культурно-просветительским центром, городской достопримечательностью, местом притяжения верующих, а также гостям уральской столицы. Особенный интерес бы представлял храм, построенный в акватории городского пруда, как и многие мировые храмы, построенные на воде (Церковь Покрова на Нерли, колокольня при Никольском соборе, храм святителя Николая Чудотворца на набережной р. Днепр и др.). Но сложные инженерно-геологические условия повлияли на отказ от проекта «Храма-на-воде». А вот от строительства храма в сквере у здания Драмтеатра (на коренном берегу) отказались далеко не по инженерно-геологическим причинам.

Литература

1. Алексеева З. Как строили храмы на Руси. 07.03.2014 г. [электронный ресурс] — режим доступа: <http://smartnews.ru/articles/16516.html#ixzz56mJHw75l> (обращение 27.01.2021).
2. Баталова А. Архитектор, создавший сенсационный проект «Храма-на-воде»: «Строительство начнётся года через два. 8 июня 2016. [электронный ресурс] — режим доступа: http://www.e1.ru/news/spool/news_id-50987811.html (обращение 27.01.2021).
3. Дубейковский С.Г., Овечкина О.Н., Семакин В.П. Особенности инженерных изысканий на Среднем Урале. Проблемы и задачи инженерно-строительных изысканий // Проблемы инженерной геологии карста урбанизированных территорий и водохранилищ: материалы Всеросс. науч.-практ. конф. / Перм. ун.-т; ВерхнекамТИСИЗ и др. – Пермь, 2008. – С. 246-250.
4. Дубейковский С.Г., Овечкина О.Н. Инженерно-геологические условия высотного строительства в г.Екатеринбурге // Инженерная геология, декабрь 4/2011. – С. 32-41.
5. Овечкина О.Н. Оценка и прогноз изменения состояния геологической среды при техногенном воздействии зданий высотной конструкции в пределах города Екатеринбурга: дис. канд. геол.-минерал. наук: 25.00.08 / Овечкина Ольга Николаевна. – Екатеринбург, 2013, 159 с.
6. Основание Екатеринбурга (Источник информации - портал История.РФ), [электронный ресурс] — режим доступа: <https://histrf.ru/lenta-vremeni/event/view/osnovaniie-iekatierinburgha> (обращение 28.01.2021).
7. Ярг Л.А. Методы инженерно-геологических исследований процесса и кор выветривания. М. Недра, 1991, 138с.

ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ АЛЕКСАНДРОВСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗАБАЙКАЛЬЯ

В.Е. Ольховатенко, О.А. Бычков, Н.А. Филиппова

Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003 г. Томск, пл. Соляная 2. E-mail: igg@tsuab.ru

1. Краткая характеристика природных условий месторождения

Александровское золоторудное месторождение расположено в Восточно-Забайкальском таежном регионе. При разработке месторождения открытым способом возникает целый комплекс проблем, среди которых центральное место занимает проблема устойчивости грунтовых массивов в бортах карьеров. Решение этой проблемы на всех стадиях освоения месторождения требует детального изучения инженерно-геологических условий, состава и физико-механических свойств грунтов с целью оценки их устойчивости в бортах золоторудных карьеров [1-4].

Физико-географические условия месторождения обусловлены принадлежностью его к Восточно-Забайкальскому горно-таежному округу. Территория месторождения представляет типичную среднегорную страну с довольно расчлененным рельефом. Основной орографической единицей является Шелкинский хребет, который простирается в северо-восточном направлении. Максимальная абсолютная отметка территории составляет 915 м, минимальная - 650 м.

Климат района исследований отличается резко выраженной континентальностью, проявляющейся как в большей амплитуде колебаний температуры воздуха, так и в исключительной неравномерности распределения осадков в течение года. Континентальность связана с положением Забайкалья внутри Евразийского материка и глубоким развитием устойчивого сибирского антициклона. Оба эти фактора усиливаются общим характером циркуляции воздушных масс, из-за чего воздушные массы с Тихого океана существенного влияния на климат внутри континентальных областей умеренного пояса в северном полушарии не оказывают. Годовой размах колебаний среднемесячных многолетних температур воздуха, отражающий степень континентальности климата достигает - 45,9°C. Средний многолетний показатель континентальности по Ценкеру - 99.

Характерной особенностью циркуляции атмосферы в пределах Забайкалья является господство континентального воздуха умеренных широт и широкое развитие процессов трансформации воздуха. Преобладающим является перенос воздушных масс с северо-запада, составляющих в холодный период года около 60% всех случаев перемещения воздушных масс, в теплый период года им принадлежит около 30%.

В геологическом строении месторождения принимают участие раннепротерозойские и мезозойские интрузивные магматические образования, повсеместно перекрытые отложениями четвертичного возраста. Литологический состав раннепротерозойских отложений представлен среднезернистыми порфиробластическими биотитовыми порфирами, гранодиоритами, плагиогранитами и гранитогнейсами.

Александровское месторождение характеризуется сложным тектоническим строением, наличием систем разновозрастных северо-восточных, северо-западных и субширотных разломов, разделяющих месторождение на ряд блоков.

2. Результаты изучения минерального состава и текстурно-структурных особенностей пород под микроскопом

Исследования минерального состава пород Александровского месторождения под микроскопом выполнено по четырем образцам горных пород, представленных гранитом, гранодиоритом, метадiorитом, микродиоритом (Рис. 1-4).

Гранит катаклазированный - полнокристаллическая порода лейкократового облика с розоватым оттенком, крупнозернистой структуры. Текстура вкрапленная, обусловленная тонкой редкой сульфидной вкрапленностью в однородной массе породы. Структура породы гипидиоморфная нерав-

номернозернистая гранитовая. Минеральный состав: КПШ-30%, плагиоклаз-30%, кварц-25%, биотит-10%, сфен≈1%, рудное вещество-1%, карбонат-3%.

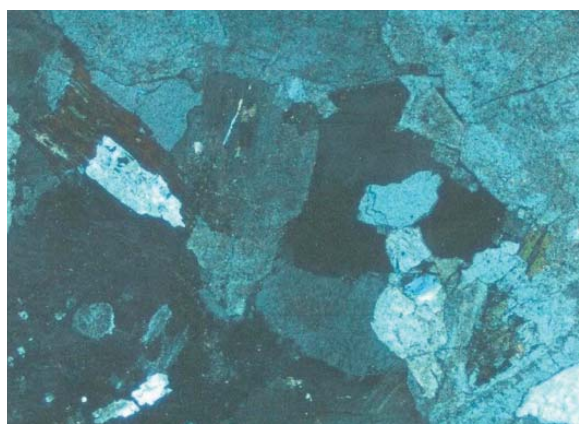
Плагиоклаз отмечается в форме крупных таблитчатых кристаллов преимущественно полисинтетически сдвойникованных, реже с зонально-полисинтетическим строением. Отмечаются пойкилобластовые структуры метасоматической альбитизации. Вторичные изменения проявляются в сосюритизации и карбонатизации значительной части зерен.

Кварц представлен ксеноморфными выделениями первой генерации с размером зерен 5-6 мм. Часть первичных кварцевых зерен характеризуется наличием тонких регенерационных каемок. Зерна чистые, прозрачные. Агрегаты более позднего гранулированного кварца имеют значительно меньшие размеры зерен и характеризуются мутностью, наличием тонкодисперсных примесей.

Гранодиорит - полнокристаллическая порода лейкократового облика, средnezернистой структуры. Текстура однородная. Структура породы гипидиоморфнозернистая, гранитовая, интергранулярная. Микротекстура прожилковая, обусловленная наличием секущих прожилков карбонатного состава.



1. Гранит



2. Гранодиорит



3. Мегациорит



4. Микродиорит

Рис. 1-4. Структура горных пород под микроскопом, николи скрещены, увеличение в 25 раз.

Минеральный состав: КПШ-35%, плагиоклаз-25%, кварц-18%, биотит-15%, сфен≈2%, рудное вещество-2%, карбонат-1%, хлорит-2%, серицит-доли %. КПШ представлен изометрическими пластинчатými зернами размером до 2-3 мм. Отмечается простое двойникование зерен и пертитовые структуры. Вторичные изменения выражаются в пелитизации, зерна приобретают буроватый оттенок вследствие сорбции тонкодисперсным глинистым веществом гидроксидов железа. Плагиоклаз отмечается в виде идиоморфных таблитчатых кристаллов с отчетливо выраженной спайностью в 2 направлениях и зональным строением. Отчетливое проявление спайности обусловлено начальными явлениями катаклаза. Зональность прямая. В ряде зерен периферийные зоны характеризуются полисинтетическим двойникованием либо антиперитизацией. Антипертиты отличаются законо-

мерным распределением, что позволяет отнести их к пертитам распада твердого раствора. Полностью полисинтетические сдвойникованные зерна плагиоклаза характеризуются меньшими размерами и представлены в незначительном количестве. Вторичные изменения проявляются в сосюритизации зон более основного состава. Локально проявляется серицитизация. Серицит, представленный мелкими бесцветными чешуйками с низким рельефом и желтыми интерференционными окрасками, развивается по направлениям спайности в крупных зернах. Размер основной массы зерен плагиоклаза 1-2 мм по удлинению.

Кварц характеризуется ксеноморфными выделениями размером зерен 2-3 мм. Зерна чистые, прозрачные. Отмечаются ориентированные тонкодисперсные газовой-жидкие включения, т.н. полоски Бёма.

Биотит представлен листоватыми деформированными, изогнутыми образованиями с характерной продольной спайностью, псевдоабсорбцией и резким плеохроизмом в буро-зеленых тонах. В зернах биотита отмечаются микровключения циркона, окруженные темными плеохроирующими ореолами. Вторичные изменения выражаются в хлоритизации значительной части зерен и выноса железа, которое формирует оксидные соединения в виде точечных образований, незакономерно ориентированных в объеме зерна, либо скоплений на его периферии.

Метадиорит – полнокристаллическая порода лейкократового облика, среднезернистой структуры. Текстура в целом однородная, локальная пятнистость обусловлена гнездовыми проявлениями мелкозернистых агрегатов метасоматического эпидота оливково-зеленого цвета. Структура породы гипидиоморфнозернистая, диоритовая, интергранулярная. Микротекстура прожилковая, обусловленная наличием прямолинейных секущих прожилков мощностью 0,1 мм, выполненных микрозернистым кварц-хлоритовым агрегатом.

Плагиоклаз представлен идиоморфными удлиненно-пластинчатыми лейстами зонального строения. Зональность прямая, определяющая уменьшение основности состава плагиоклаза от внутренних зон к внешним. В ряде зерен периферийные зоны характеризуются полисинтетическим двойникованием, соотносимым с метасоматическим преобразованием (альбитизацией). Зоны более основного состава также подвержены вторичным изменениям сосюритизации, эпидотизации. Сосюрит представлен тонкодисперсными слабополяризующими агрегатами буроватой окраски с относительно высоким рельефом. Размер основной массы зерен плагиоклаза 2-3 мм по удлинению.

КПШ (первичный) образует более крупные по сравнению с плагиоклазом изометричные зерна размером 5-6 мм. Незначительная часть зерен, как правило, размеры которых не превышают 1,5 мм, характеризуются простым двойникованием. Метасоматический микроклин образует участки с пойкилобластовой структурой, характеризующейся идиоморфными включениями зерен зонального плагиоклаза размером 0,3-0,5 мм в объеме одного зерна микроклинового состава с волнистыми извилистыми линиями ограничения.

Роговая обманка представлена призматическими зернами, поперечными изометрическими сечениями и шестовато-лучистыми агрегатами размером 1,0-0,5 мм. Цвет бледно-зеленый с отчетливым плеохроизмом светлых зелено-бурых оттенков. Зерна подвержены опацицитизации (точечные проявления оксидов железа, незакономерно распределенные в объеме зерна) и актинолитизации с последующей наложенной хлоритизацией. Тонкочешуйчатые агрегаты хлорита ориентированы ортогонально удлинению зерен роговой обманки.

Сфен аксессуарный минерал ранней генерации, характеризуется отчетливым идиоморфизмом - типичной клиновидной формой. Отмечаются также и несовершенные скелетные формы в ассоциации с рудным веществом. Цвет бурый почти черный, что связывается с повышенным содержанием железа. Размер зерен 0,3-0,1 мм.

Кварц ксеноморфный интерстиционный. Размер зерен 0,5-0,3 мм. Распределение в объеме породы незакономерной в виде скоплений. Постмагматический тонкозернистый кварц отмечается в ассоциации с хлоритом, формируя секущие породы тонкие прожилки.

Микродиорит хлоритизированный - полнокристаллическая порода темно-серого цвета с зеленоватым оттенком мелкозернистой структуры. Текстура однородная. Структура породы гипидиоморфнозернистая, диоритовая.

Минеральный состав: плагиоклаз-55%, амфибол-20%, биотит-15%, кварц-5%, сфен менее 1%, рудной вещество-2%, карбонат-2%.

Плагиоклаз отмечается в виде относительно крупных таблитчатых кристаллов зонального строения. Зональность прямая. Вторичные изменения проявляются в сосюритизации зон более основного состава. Размер зерен плагиоклаза 0,5-1,0 мм.

Роговая обманка представлена мелкими призматическими зернами, и тонко-шестоватыми агрегатами размером 1,0-0,5 мм. Цвет бледно-зеленый с отчетливым плеохроизмом светлых зелено-бурых оттенков. Зерна подвержены актинолитизации, биотитизации с последующей хлоритизацией.

Карбонат слагает постмагматические крестообразно секущие породу тонкие прожилки невыдержанной мощности с раздувами и пережимами. В среднем мощность прожилков определяется интервалом 0,3-0,5 м. Зерна карбоната характеризующиеся относительным идиоморфизмом, мелко-ромбическими выделениями, ориентированными ортогонально направлению прожилка представлены доломитом.

Микродиорит - полнокристаллическая порода темно-серого цвета, мелкозернистой структуры. Текстура однородная. Структура породы гипидиоморфнозернистая, диоритовая.

Минеральный состав: плагиоклаз-60%, амфибол-25%, биотит-5%, сфен-3%, рудное вещество-5%, карбонат-2%.

Плагиоклаз отмечается в виде таблитчатых кристаллов с зональным строением и резорбированными контурами зерен. Зональность прямая. Размер зерен плагиоклаза 0,5-1,0 мм. Отмечается наложенная постмагматическая альбитизация.

Роговая обманка представлена мелкими призматическими зернами, и тонко-шестоватыми агрегатами размером 1,0-0,5 мм. Цвет бледно-зеленый с отчетливым плеохроизмом светлых зелено-бурых оттенков. Зерна подвержены актинолитизации, биотитизации с последующей хлоритизацией.

Отмеченные различия минерального состава и текстурно-структурных особенностей оказали большое влияние на физико-механические свойства пород, характеристика которых приводится ниже.

Таблица 1.										
Инженерно-геологическая классификация скальных грунтов Александровского месторождения										
Инженерно-геологические			Физико-механические свойства пород							
группы	типы	виды	Плотность частиц, г/см ³	Плотность, г/см ³	Влажность, %	Пористость, %	Предел прочн. при одноосном сжатии, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Угол внутреннего трения, град.	Удельное сцепление, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Скальные магматические грунты	граниты	слабопрочные	<u>2,64-2,66</u> 2,65	<u>2,60-2,53</u> 2,54	<u>0,16-0,59</u> 0,37	<u>2,63-5,28</u> 4,34	<u>25,0-36,8</u> 30,15	<u>3,3-4,10</u> 3,60	<u>35-39</u> 37	<u>6,75-8,10</u> 7,46
		среднепрочные	<u>2,64-2,74</u> 2,69	<u>2,56-2,66</u> 2,62	<u>0,08-0,31</u> 0,20	<u>1,48-3,41</u> 2,91	<u>49,2-58,7</u> 52,7	<u>5,7-7,6</u> 6,6	<u>30-37</u> 33	<u>13,7-14,9</u> 14,09
		прочные	<u>2,64-2,75</u> 2,69	<u>2,51-2,71</u> 2,61	<u>0,13-0,38</u> 0,21	<u>1,45-5,30</u> 2,90	<u>60,0-75,0</u> 66,5	<u>6,8-8,3</u> 2,54	<u>33-40</u> 37	<u>15,0-17,6</u> 6,7
	диориты	слабопрочные	2,74	2,70	0,10	1,46	32,2	4,8	39	7,5
		среднепрочные	<u>2,67-2,74</u> 2,71	<u>2,54-2,73</u> 2,64	<u>0,10-0,57</u> 0,44	<u>1,46-5,24</u> 3,4	<u>32,2-71,2</u> 59,8	<u>4,8-6,2</u> 5,53	<u>38-41</u> 39	<u>7,5-17,5</u> 14,5
		прочные	<u>2,68-2,78</u> 2,75	<u>2,56-2,75</u> 2,67	<u>0,19-0,44</u> 0,29	<u>1,80-6,16</u> 3,51	<u>75,8-98,7</u> 84,16	<u>7,5-10,0</u> 7,98	<u>38-39</u> 38° 30'	<u>17,4-22,5</u> 19,4
	*гранодиорит	не выделяются	2,67	2,61	0,06	2,25	82,4	8,7	39	20,0
	гранит-порфир	не выделяются	2,68	2,55	0,22	5,22	72,0	7,8	40	16,2
	аплитовидный гранит	не выделяются	2,69	2,57	0,15	4,83	51,0	7,0	35	12,6
	*микродиорит	не выдел.	2,78	2,73	0,71	2,16	92,0	11,8	36	23,5

3. Характеристика физико-механических свойств горных пород Александровского месторождения

Анализ и обобщение результатов изучения физико-механических свойств пород позволил разработать инженерно-геологическую классификацию, в которой инженерно-геологическая группа грунтов выделена по генетическим признакам, типы по литолого-минералогическому составу, а виды по инженерно-геологическим признакам и прочностным характеристикам (табл.1).

Основными литологическими типами грунтов в данном случае являются граниты и диориты, реже встречаются гранодиориты, аплитовидные граниты. Характеристика минерального состава и структурно-текстурных особенностей перечисленных литологических типов пород приведена выше. С учётом минерального состава, структуры и прочностных характеристик скальные грунты отчетливо делятся на слабопрочные, среднепрочные и прочные.

Граниты по своим физическим свойствам отличаются незначительно. Так, плотность частиц в среднем составляет 2,65-2,69 г/см³, плотность 2,54-2,62 г/см³, пористость 2,91-4,34%. Наименьшей плотностью и наибольшей пористостью обладают слабопрочные граниты. В то же самое время выделенные инженерно-геологические типы гранитов существенно отличаются по своим прочностным характеристикам. Так, среднее значение предела прочности при одноосном сжатии у слабопрочных гранитов оказалось 30,15 МПа, среднепрочных 52,7 МПа, а прочных 66,5 МПа (таблица 1). Аналогично изменяется предел прочности при растяжении и удельное сцепление. Для слабопрочных гранитов удельное сцепление оказалось равным 7,46 МПа, среднепрочных 14,06 МПа, а прочных 16,7 МПа.

Следует отметить, что самой высокой прочностью обладают гранодиориты. Так для образца данной породы по скважине 1135 с глубины 103,1 м предел прочности на одноосное сжатие оказался равным 82,4 МПа, а растяжения 8,7 МПа, удельное сцепление 20,0 МПа, а угол внутреннего трения 39° (табл. 1).

Диориты слабопрочные, несмотря на довольно высокую плотность, характеризуются низкой прочностью. Предел прочности при одноосном сжатии для них составляет 32,2 МПа. Среднепрочные диориты по своим прочностным характеристикам довольно близки к среднепрочным гранитам (табл. 1). Для диоритов предел прочности при одноосном сжатии составляет 59,8 МПа, растяжении 5,53 МПа, а удельное сцепление 14,5 МПа (табл. 1). В то же самое время угол внутреннего трения оказался выше, чем у гранитов и в среднем составил 39°. Прочные диориты существенно отличаются по своим физико-механическим свойствам от гранитов. Предел прочности при одноосном сжатии в среднем составляет 84,16 МПа, удельное сцепление 19,4 МПа, а угол внутреннего трения 38° (табл. 1). Физико-механические свойства других литологических типов пород по данным единичных определений приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что самой высокой прочностью характеризуется микродиорит, для которого предел прочности при одноосном сжатии составляет 92,0 МПа, растяжении 11,8 МПа, удельное сцепление 23,5 МПа. Несколько ниже оказался предел прочности при одноосном сжатии и удельное сцепление у гранодиорита, которые соответственно составляют 82,4 МПа и 20,0 МПа. Промежуточное положение занимают гранит-порфир и аплитовидный гранит. Для первого предел прочности при одноосном сжатии равен 72,0 МПа, растяжении 7,8 МПа, для второго соответственно имеем 51,0 МПа и 7,0 МПа.

По результатам выполненных исследований были построены графики и установлены взаимосвязи между физико-механическими свойствами пород (Рис. 5). Как видно из приведенных данных наблюдается четкая зависимость предела прочности при одноосном сжатии от плотности и пористости пород. С увеличением плотности и снижением пористости увеличивается предел прочности при одноосном сжатии. Довольно тесная корреляционная зависимость установлена между пределом прочности при одноосном сжатии, пределом прочности при растяжении и удельным сцеплением (Рис. 7). В то же самое время практически отсутствует корреляционная связь между пределом прочности при одноосном сжатии и углом внутреннего трения. Это лишнее раз подчеркивает большое влияние на прочность пород при сжатии, растяжении и удельное сцепление минерального состава, состояния пород и типа структурных связей, в то время как внутреннее трение преимущественно зависит от степени выветрелости и микротрещиноватости пород.

Анализ результатов изучения физико-механических свойств позволил обосновать расчетные характеристики скальных грунтов, слагающих борта золоторудного месторождения. При этом расчетные значения удельного сцепления составила 15 кПа, а угол внутреннего сцепления 37°. Ис-

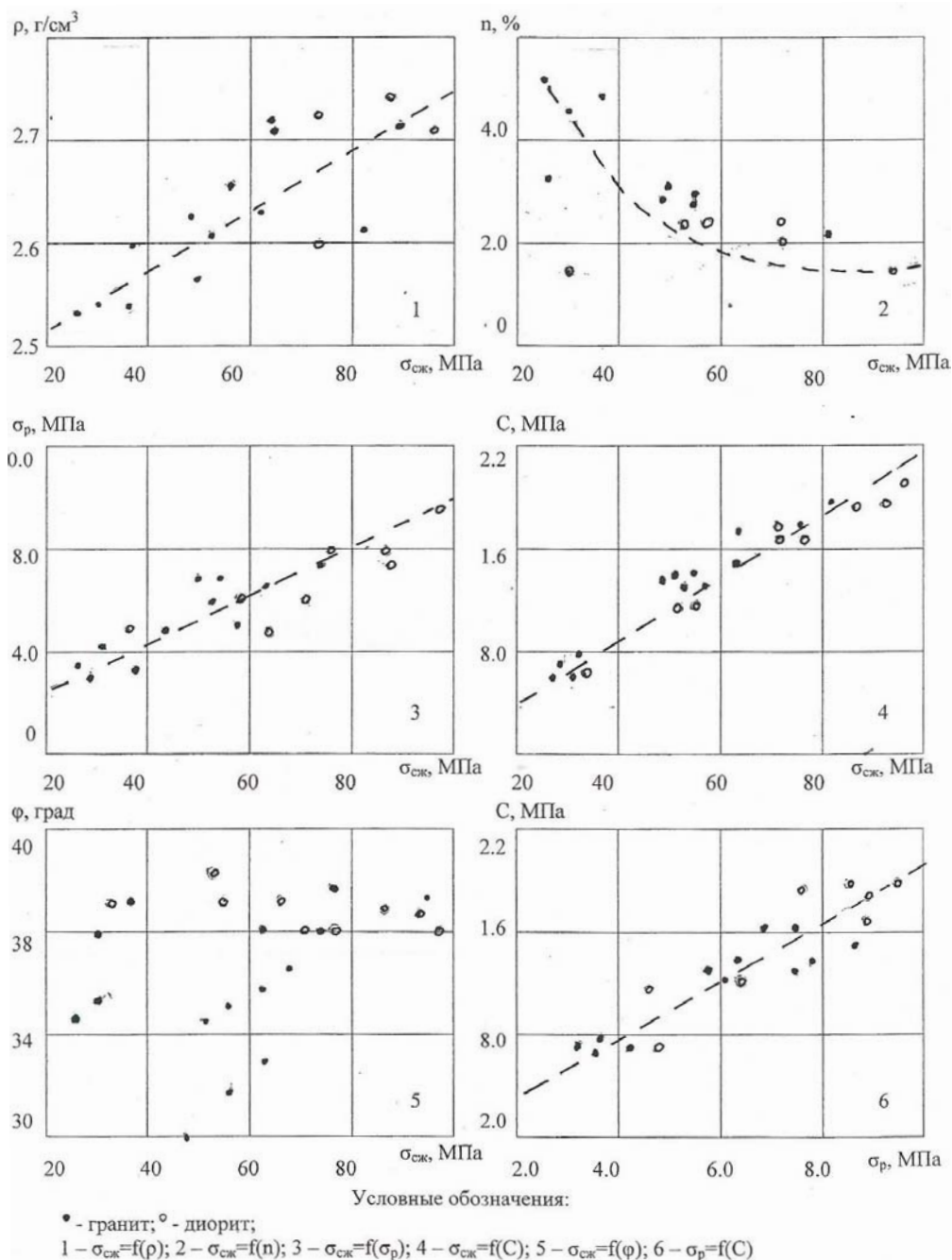


Рис. 5. Взаимосвязи между физико-механическими свойствами горных пород Александровского месторождения.

пользуя полученные расчетные значения прочностных характеристик были выполнены расчеты устойчивости бортов карьеров методом Н.Н. Маслова.

По данным расчетов устойчивость бортов карьеров будет обеспеченной для глубины 200м с углами наклона 34^0 и коэффициентом устойчивости равном 1.20

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Изученные типы скальных грунтов отличаются по своему минеральному составу, структурно-текстурным особенностям и физико-механическим свойствам. В составе гранитов преобладают КПШ, плагиоклаз, кварц, в то время как для диоритов характерно высокое содержание плагиоклаза и амфиболов. Для последних, как правило, характерна мелкозернистая структура, а для гранитов средне- и крупнозернистая.

2. На прочностные свойства пород, помимо минерального состава и структурно-текстурных особенностей оказали влияние состояние и степень выветрелости и нарушенности грунтов под влиянием процессов гипергенеза и воздействия. При этом четко просматривается снижение прочностных характеристик при уменьшении плотности и увеличении пористости пород.

3. Среди выделенных типов пород наиболее прочными оказались микродиориты и гранодиориты, которые будут обладать и наибольшей устойчивостью в бортах карьеров.

4. Для обеспечения геоэкологической безопасности при разработке месторождения открытым способом необходимо разработать и внедрить целевую комплексную программу мониторинга за состоянием устойчивости грунтов в бортах карьеров и развитием опасных геологических процессов. С целью уточнения параметров карьеров необходимо выполнить натурные испытания грунтов в бортах карьеров и провести расчеты их устойчивости.

Литература

1. *Голодковская Г.А., Савич А.И., Шаумян Л.В. Опыт комплексных инженерно-геологических и геофизических исследований массивов скальных пород в процессе разведки месторождений полезных ископаемых. – В сб: Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. Изд-во. МГУ, 1970*
2. *Ломтатзе В.Д. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых. Изд-во “Недра”, 1986 – 272 с.*
3. *Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. М.: Высшая школа, 1982 – 250 с.*
4. *Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965 – 184 с.*

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПОЙМЕННО-НАМЫВНОЙ ТЕРРИТОРИИ г. ЯКУТСКА

Н.А. Павлова, М.В. Данзанова, В.В. Огонеров

Институт мерзлотоведения им П.И. Мельникова СО РАН,
677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36. E-mail: napavlova@mpi.ysn.ru

Наиболее распространенным способом инженерной подготовки грунтов на периодически затопляемых территориях является гидронамыв. Он широко используется как за рубежом, так и в России [5-7, 9, 18]. В области развития многолетнемерзлых пород устройство намывного грунтового основания под капитальное гражданское строительство реализовано г. Якутска за счет освоения пойменной части р. Лены [8, 13, 14]. Инженерная подготовка территории первой очереди застройки (202 квартал) гидромеханизированным способом производилась в летнее время 1979–1982 гг., после этого последовала его планомерная застройка. В конце 1980 – начале 1990-х годов на прилегающей территории, выше по течению р. Лены, было создано еще одно намывное основание для 203 квартала. К его градостроительному освоению приступили в 2013 г. Для намыва использовали аллювиальные пески протоки р. Лены. Общая площадь новой территории 0,67 км², а мощность техногенных грунтов – от 4 до 15 м. Абсолютные отметки земной поверхности, обеспечивающие исключение ее затопления речными водами, составляют 97–98 м.

Перед массовой застройкой 202 квартала, ввиду отсутствия опыта использования намывных территорий со сложными мерзлотно-гидрогеологическими условиями, был проведен комплекс натурных, лабораторных и экспериментальных исследований. Результаты этих работ послужили основанием для выбора первого принципа строительства на пойменно-намывной территории г. Якутска [13, 14]. В настоящее время на значительной части 202 квартала и на всей площади 203 квартала грунты до глубины 10 и более метров имеют положительные температуры, а построенные здания эксплуатируются по второму принципу [10, 16, 22]. Одной из причин сохранения таликов видится наличие рядом полноводной р. Лены. Для обеспечения безопасной эксплуатации зданий, а также планирования стратегического освоения пойменных территорий в криолитозоне, необходимо оценить современную мерзлотно-гидрогеологическую обстановку, сложившуюся здесь за последние десятилетия.

Впервые обстоятельный анализ мерзлотно-гидрогеологических условий и особенностей режима подземных вод на намывных территориях криолитозоны приведен в работах Л.Т. Роман и др. [13, 14]. Авторами на основе результатов гидрогеологических наблюдений, выполненных в 1992–1994 гг. на площади 202 квартала г. Якутска, рассмотрены особенности формирования техногенных таликов при гидромеханизированных работах и выделены три главных фактора, влияющих на динамику подземных вод в годы застройки новой территории. Было установлено, что в период весеннего паводка решающее значение в повышении обводненности грунтов имеет р. Лена. Об этом свидетельствовал синхронный подъем уровня воды в реке и гидрогеологических скважинах. Летом на подтопление грунтов готовой к освоению территории определяющее влияние оказывал намыв соседнего микрорайона. Осенью и зимой были нередки утечки из водонесущих коммуникаций, которые способствовали высокому положению уровня подземных вод. Последние два фактора содействовали и повышению температуры грунтов. После окончания гидромеханизированных работ была зафиксирована тенденция к охлаждению намытой толщи в области положительных значений температур. Промерзание переотложенных песков и грунтов природного основания, согласно математическим расчетам разных авторов, прогнозировалось через 6–150 лет после освоения территории [14]. Все перечисленные закономерности по аналогии были перенесены и на территорию смежного 203 квартала, расположенного выше по течению р. Лены.

На территории 203 квартала комплексные мерзлотно-гидрогеологические исследования были начаты в 2013 г., т.е. спустя более 25 лет после намыва. Оценка современного состояния грунтового основания и площадного распространения подземных вод проведена на основе анализа результатов инженерно-геологических работ, выполненными различными изыскательскими и научными орга-

низациями в 2013–2019 гг. Изучение режима подземных вод проводится с 2014 г. Наблюдательная сеть первоначально состояла из четырех гидрогеологических скважин (№1–4). Две из них заложены на участках реликтовых подоцерных таликов, две других – в местах погребенных прирусловых валов. Впоследствии при застройке территории три скважины были уничтожены. В 2019 г. рядом с объектами капитального строительства были пробурены четыре новые наблюдательные скважины (№5, 9, 10 и 12). Они обсажены до глубины 15–22 м, в интервалах обводненных пород оборудованы сетчатым фильтром, в трех скважинах установлены датчики автоматической регистрации уровня.

Для изучения гидрохимической обстановки водные пробы из скважин отбирали один раз в месяц в первый год наблюдений, затем один раз в квартал. Аналитические исследования водных проб выполнены в Институте мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН методами титриметрии и капиллярного электрофореза. Для оценки взаимосвязи подземных вод с поверхностными водами р. Лены проанализированы результаты наблюдений за уровнем речных вод в районе гидропоста г. Якутск, заимствованные с сайта Информационной системы по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России (<http://gis.vodinfo.ru>). Характеристика состава поверхностных и подрусловых вод р. Лены дана на основе анализа фондовых материалов и собственных гидрохимических исследований.

Намывная территория г. Якутска ограничена с запада уступом первой надпойменной террасы р. Лена, с севера – ограждающей городской дамбой, с востока – Городской протокой. Ширина долины р. Лена на отрезке от Табагинского до Кангаласского мыса изменяется от 5 до 10 км. Русло реки в районе г. Якутска многорукавное, подвержено разнонаправленным смещениям и осложнено многочисленными островами [17, 21]. Река относится к восточносибирскому типу, ее годовой гидрограф отличается интенсивным подъемом уровня воды во время весеннего паводка: в зимнюю межень (март–апрель) уровень речных вод находится на отметках 81,7–83,5 м, а его подъем во время весеннего паводка достигает 7–11 м, вызывая затопление широкой поймы. Наиболее высокие уровни р. Лены в районе г. Якутска наблюдаются при заторах льда. В это время отметки уровня 5% обеспеченности составляют 94,7 м, а среднее многолетнее значение расхода воды 36200 м³/с [11, 12]. Летом на гидрографе реки отмечается от одного до четырех пиков, связанных с дождями и таянием льда сезонного слоя на водосборной площади. Ледообразование на р. Лене происходит в октябре. В соответствии с изменениями гидрологической обстановки изменяется и температура воды в реке: зимой и во время весеннего паводка температура речной воды равна 0–1°C, в июне – около 10–12°C, а в июле 15–17°C [19].

Химический состав воды в р. Лене также подвержен сезонным изменениям. В весенне-летний период, когда питание реки осуществляется преимущественно за счет таяния снега и жидких атмосферных осадков, минерализация поверхностных вод 70–100 мг/л при хлоридно-гидрокарбонатном натриево-кальциевом или магниевом-кальциевом составе. К концу лета содержание растворенных веществ увеличивается до 170–180 мг/л [1]. Зимой, при переходе на подземное питание, минерализация воды в реке на фарватере около 500–700 мг/л, а в протоках у г. Якутска достигает 800 мг/л. По химическому составу речная вода становится хлоридно-гидрокарбонатной кальциево-натриевой.

В геологическом строении днища долины р. Лены в районе г. Якутска принимают участие верхнечетвертичные аллювиальные отложения и породы среднеюрского возраста. Мощность аллювиального комплекса под руслом реки изменяется от 6 до 18 м. Отложения представлены мелко- и среднезернистыми кварц-полевошпатовыми песками, в основании разреза – с гравием и галькой кварца, кремния, известняков. Их постилают среднеюрские алевролиты и кварц-полевошпатовые, слюдястые песчаники с частыми прослоями глин.

Под руслом и протоками реки, имеющими постоянный сток, развиты надмерзлотные фильтрационные талики мощностью до 40–60 м [1, 3]. Под пересыхающими и перемерзающими протоками, а также старичными озерами на пойме реки мощность водоносного горизонта не превышает 10–12 м. Водоупором для надмерзлотных вод служат многолетнемерзлые породы. Их подошва в долине р. Лены у г. Якутска вскрыта на о. Пономарев на глубине 320 м геологами ГУГГП РС(Я) «Якутск-геология».

Минерализация и химический состав подрусловых вод по разрезу неоднородны [1, 2]. В верхней части четвертичного водоносного горизонта количество растворенных веществ в воде составляет 0,38–0,84 г/л и с глубиной увеличивается до 0,8–1,3 г/л, рН варьирует от 6,7–7,9. Ее химический

тип изменяется в годовом цикле, в соответствии с составом питающей речной воды. Формирование химического состава подрусловых вод среднеюрских отложений происходит в условиях относительно замедленного водообмена. Об этом свидетельствует их повышенная щелочность (рН 8,0–8,3) и превалирование натрия над другими катионами.

Абсолютные отметки поймы р. Лены составляют 85 – 89 м. До намывных работ в районе 202 и 203 кварталов г. Якутска имелось два крупных старичных озера шириной 100–120 м, вытянутых вдоль направления русла реки (Рис. 1). Относительное превышение разделяющего их увала над дном водоемов составляло 2,5–4,0 м. Ежегодно во время весенних и летних паводков эта территория затапливалась поверхностными водами р. Лены. При инженерных изысканиях в 1980-1990-х годах разведочными скважинами под озерами были вскрыты несквозные водоносные талики мощностью до 7–10 м [14]. Водовмещающие отложения – мелко- и среднезернистые пески. Химический тип надмерзлотных вод в подошвенных таликах близок к составу подрусловых вод. Старичные озера с надмерзлотными таликами впоследствии были замыты 10–15-метровым слоем техногенного грунта.

Межозерные пространства сложены отложениями пойменной фации – супесями, пылеватыми песками с включениями растительных остатков и торфа. В естественных условиях глубина сезонного протаивания грунтов составляла 1,5–3,0 м. В подошве слоя годовых теплооборотов (10–12 м) температура пород изменялась от минус 0,3–0,5°C до минус 0,8–1,2°C. При устройстве намывного основания за счет высокой температуры пульпы произошло углубление кровли многолетнемерзлых пород на увалах и под 6–8-метровой толщей техногенного грунта сформировались искусственные водонасыщенные талики мощностью до 3–5 м [13].

По данным буровых работ 2013–2019 гг. на территории 203 квартала мощность насыпных грунтов изменяется от 5,8 до 15,2 м. Глубина их сезонного промерзания 3,8–5,0 м [20]. На участках погребенных увалов кровля криогенного водоупора залегает на глубине 9,8–14,8 м. Это на 2–3 м ниже, чем в 1990 г. перед началом планомерных намывных работ на этой площади. В местах за-

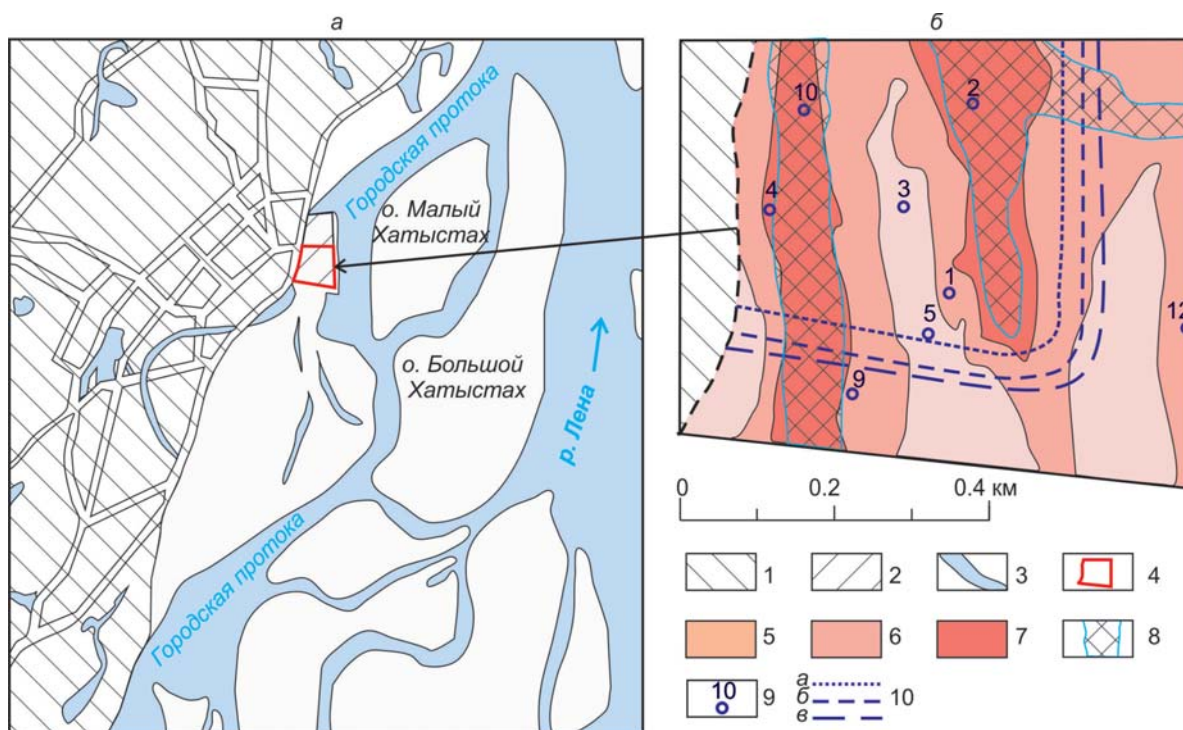


Рис. 1. Фрагмент схемы г. Якутска (а) и Мерзлотно-гидрогеологическая схема 203 квартала г. Якутска (по состоянию на 2015-2019 гг.) (б).

(а): 1 – территория города на низкой надпойменной террасе р. Лены, 2 – пойменно-намывная территория; 3 – водотоки и водоемы; 4 – территория 203 квартала г. Якутска; (б): 5–7 – надмерзлотные талики с грунтовыми водами: 5 – мощность таликов 10-15 м; 6 – мощность таликов 15-20 м; 7 – мощность таликов более 20 м; 8 – старичные погребенные озера; 9 – режимная гидрогеологическая скважина и ее номер; 10 – граница насыщения грунтов за счет боковой фильтрации при разной процентной обеспеченности (n) заданных уровней р. Лены: а – n=50% (92,2 м); б – n=10% (94,7 м); в – n=1% (97,3 м).

сыпанных старичных озер толщина грунтов с положительными температурами достигает мощности 16–20 и более метров.

Повсеместно с глубины 6,4–13 м грунты водонасыщенные. Подземные воды преимущественно безнапорны и лишь в местах залегания водоупорных прослоев наблюдается местный напор до 0,3–0,5 м. Мощность обводненной толщи в зависимости от отметок кровли криогенного водоупора изменяется от 0,5–6,0 м на участках погребенных увалов до 12 и более метров на площадях замкнутых старичных озер (Рис. 1).

Свободная поверхность надмерзлотных грунтовых вод испытывает сезонные колебания (Рис. 2). Ее самые низкие отметки отмечаются в марте – начале мая и соответствуют периоду зимней межени в р. Лене. Уровень речных вод в это время залегает на 3–4 м ниже, чем у надмерзлотных таликовых вод на намывной территории. В мае, с первой волной половодья, происходит быстрый подъем уровня воды р. Лены. В течение 7–17 суток абсолютные отметки поверхности речных и надмерзлотных грунтовых вод выравниваются. Затем в условиях подпора начинается интенсивное питание подземного водоносного горизонта поверхностными водами р. Лена. В конце июня - начале июля, на фоне спада паводочных уровней, происходит медленная сработка запасов подземных вод погребенных таликов.

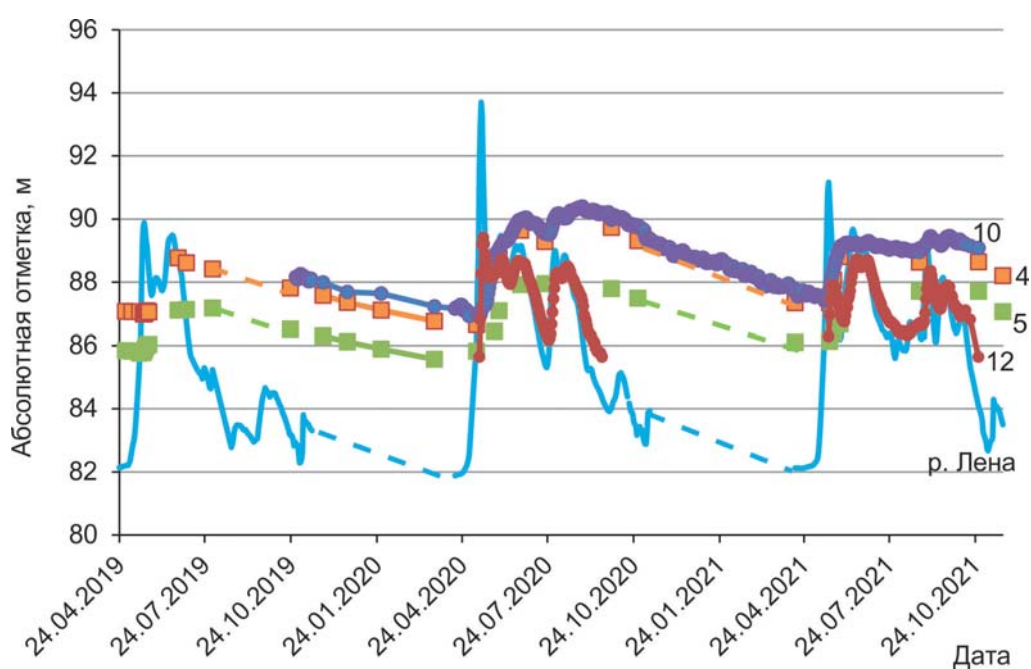


Рис. 2. Изменение уровня надмерзлотных грунтовых вод на территории 203 квартала и р. Лена (гидропост г. Якутск) в 2019–2021 гг. (символ и цифра – гидрогеологическая скважина и ее номер).

Годовая амплитуда колебания уровня надмерзлотных грунтовых вод, которая характеризует размеры восполнения их запасов в период питания, в 2015–2021 гг. варьировала в пределах 1,4–3,2 м. Идентичный характер изменения положения зеркала подземных надмерзлотных грунтовых вод в течение года на разных участках и морфологическое сходство с изменениями водной поверхности р. Лена свидетельствуют о сохранении на территории 203 квартала единого водоносного горизонта, связанного с поверхностными водами.

Эту связь подтверждают результаты гидрохимических исследований. На намывной территории подземные воды имеют химический состав, близкий к составу вод подруслового талика под р. Леной и речной воды в зимний период (Рис. 3). По химическому типу это хлоридно–гидрокарбонатные смешанные по катионам воды. В разрезе распределение минерализации носит характер стратификации: более низкая соленость воды характерна для верхних водоносных слоев, в нижних частях талика содержание растворенных веществ в воде увеличивается без изменения ее химического типа. Минерализация подземных вод непостоянна в течение года. Максимальные ее величины (0,6–0,8 г/л) отмечаются в марте-мае. В летний период при поступлении в намывной массив ультрапресных вод р. Лены происходит уменьшение минерализации подземных вод до 0,4–0,5 г/л.

В паводковый период действуют два механизма насыщения грунтов водой. Первый – это боковая фильтрация речных вод по контуру намывного массива. Об этом свидетельствуют выраженные сезонные изменения уровня воды в скважине 12, расположенной на погребенном увале в 46 м от современной затопляемой поймы. По аналогии с прогнозными расчетами, выполненными ранее и подтвержденными натурными наблюдениями на территории 202 квартала [13], ожидаемые размеры подтопляемой зоны за счет боковой фильтрации при наивысших уровнях р. Лены, имевшихся в 2015 и 2021 гг., равны 110–170 м (Рис. 1).

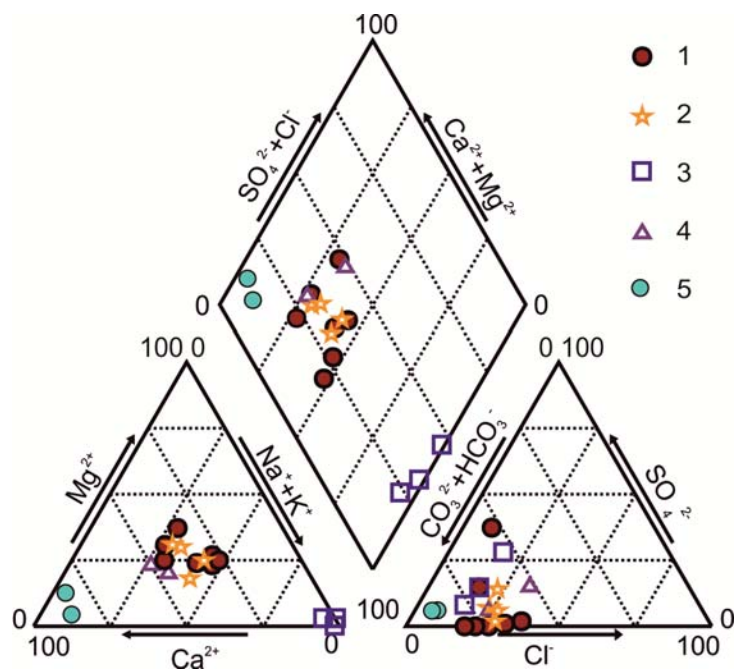


Рис. 3. Химический состав природных вод на участке исследований.

- 1 – надмерзлотные воды техногенных таликов; 2 – надмерзлотные воды подрусловых четвертичных отложений;
3 – надмерзлотные воды подрусловых юрских отложений, 4 – р. Лена; 5 – летние атмосферные осадки.

Фактически повышение отметок поверхности подземных вод в период максимального речного стока прослеживалось и в скважинах, удаленных от поймы реки на расстояние 400–600 м (см. Рис. 2). Подобная картина наблюдалась предшественниками в 1992–1994 гг. на смежной территории и частично объяснялась влиянием гидромеханизированных работ и утечками из водонесущих коммуникаций. При отсутствии техногенных факторов подъем уровня надмерзлотных грунтовых вод на всей площади 203 квартала с мая до конца июня в 2015–2021 гг. может быть объяснен только передачей давления от реки по подрусловому талику, гидравлически связанного с водоносным горизонтом под намывным массивом. По данным наблюдений за уровнем воды в р. Лене и в гидрогеологической скважине 10, путем решения обратной задачи [4] был оценен коэффициент уровняпроводности пород, характеризующий скорость распространения гидродинамического импульса от реки по водоносному горизонту. Он составил около $4,6 \cdot 10^3$ м²/сут.

Известно, что движение подземных вод обуславливает возникновение конвективных потоков и перераспределение тепловой энергии в водоносных горизонтах и зонах как по площади, так и по разрезу [15]. Ранее выполненные прогнозные расчеты температурного режима грунтов новой территории г. Якутска предполагали отсутствие непрерывной фильтрации воды в подошве намывного массива и учитывали только теплофизические свойства техногенного слоя [13, 14]. По результатам моделирования ожидалось постепенное поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород и смыкание ее со слоем сезонного протаивания. В настоящее время на территории сохраняется несливающийся тип мерзлоты. Исходя из данных гидрогеологических наблюдений следует, что существование таликовых зон под намывным массивом и их опосредованная связь с р. Ленной через подрусловый талик является важнейшим и пока малоизученным фактором формирования температурного поля пород грунтов оснований.

Таким образом, анализ результатов гидрогеологических наблюдений, выполненных 1994–1996 гг. и 2015–2021 гг. на пойменно-намывной территории в долине р. Лене, показал, что водоносные

талики, сформировавшиеся в период проведения гидромеханизированных работ, сохраняются до настоящего времени. Режим подземных вод, циркулирующих в основании намывной толщи, подчинен гидрологическому режиму р. Лены. Основные изменения в уровне и гидрохимическом режиме подземных вод происходят в период весеннего половодья. В это время действуют два механизма насыщения грунтов водой. Первый – это боковая фильтрация речных вод по контуру намывного массива. Зона влияния подъема поверхностных вод в р. Лене распространяется на 150–170 м от водотока. Вторым механизмом является передача гидравлического давления от реки по подрусловому потоку, взаимосвязанному с надмерзлотным водоносным горизонтом. Влияние второго механизма прослеживается по всей площади намывной территории.

Постоянная фильтрация воды в массиве грунтов приводит к тепловому эффекту, препятствующему многолетнему промерзанию пород. Количественно оценить роль водоносных таликов в формировании геотермического режима грунтов, в условиях сложного движения подземных вод в основании намывной толщи и накладываемого техногенного повышения температуры грунтов в пределах фундаментов инженерных сооружений, является задачей дальнейших режимных наблюдений.

Выявленные закономерности необходимо учитывать при планировании стратегического освоения пойменных территорий крупных рек криолитозоны, а также оценке рисков подтопления оснований инженерных сооружений на намывных площадях подземными водами под воздействием паводков.

Работа выполнена частично при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-05-00670).

Литература

1. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии; Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. – 189 с.
2. Анисимова Н.П., Павлова Н.А., Стамбовская Я.В. Химический состав таликовых вод в среднем течении р. Лены. Наука и образование, 2005, № 4. С. 118–124.
3. Балобаев В.Т., Иванова Л.Д., Никитина Н.М., Шепелев В.В., Ломовцева Н.С., Скутин В.И. Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. – 137 с.
4. Бочевер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестков В.М. Основы гидрогеологических расчетов. М.: Недра. 1969. – 368 с.
5. Димухаметов М.Ш., Димухаметов Д.М. Физико-механические свойства заторфованных грунтов Камской долины г. Перми и их изменение в результате действия пригрузки / Вестник Пермского университета, 2009, вып. 11 (37). – С. 94-107.
6. Жаркова Н.И., Черныйчук Г.А., Жарков И.Я., Галеев Р.К. Техногенные грунты Казани: особенности формирования состав, строения, свойств / Ученые записки Казанского университета, 2013, т. 155, кн. 4. – С. 130-143.
7. Каминская В.И. Особенности проектирования и образования намывной территории под строительство морского пассажирского терминала Санкт-Петербурга / Горный информационно-аналитический бюллетень, 2009, №S1. – С. 444-451.
8. Полещук В.Л. Подготовка площадок строительства на вечной мерзлоте способом намыва грунтов оснований / Мат-лы науч. совещ. по развитию производительных сил Якутской АССР. Якутск, 1981. – С. 10 – 15.
9. Преображенский А.А., Канаков Г.В. Проблематика и перспективы строительства на пойменно-намывных территориях Нижегородской области / Межвузовский сборник статей лауреатов конкурсов. Н. Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, 2010; Вып. 12. – С. 86-88.
10. Огонеров В.В., Павлова Н.А., Данзанова М.В. Мерзлотно-гидрогеологические особенности пойменно-намывных территорий в криолитозоне (на примере г. Якутска). Труды международной молодежной научной конференции «Экологические проблемы природо- и недропользования». Том XIX; под ред. В. В. Куриленко; СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, 2019, с. 264-268.
11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 17. Лено-Индижирский бассейн. Гидрометеиздат, Ленинград, Россия, 1972; 562 с.
12. Рождественский А.В., Бузин В.А. Условия формирования и вероятные значения наивысших уровней воды р. Лена у г. Якутск. Метеорология и гидрология, 2010, №10. – С. 77-87.

13. Роман Л.Т., Полецук В.Л., Цеева А.Н., Игнатова Г.М., Егоров Г.Е. Обеспечение надёжности строительства на намывных грунтах в криолитозоны. *Криосфера Земли*, 1998, т. II, №4, с. 72-81.
14. Роман Л.Т. Цернант А.А., Полецук В.Л., Цеева А.Н., Леванов Н.И. Строительство на намывных грунтах в криолитозоне; Издательский дом: Экономика, Строительство, Транспорт, Москва, Россия, 2008; 323 с.
15. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. Издательство МГУ, Москва, Россия, 1983; 231 с.
16. Сыромятников И.И., Куницкий В.В. Особенности температурного режима намывных песков микрорайона «202 г. Мат-лы VIII Всероссийской научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России, Т.2, Издательство Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия, 2018., с. 282-285.
17. Чалов Р.С. Завадский А.С., Рулева С.Н., Кирик О.М., Прокопьев В.Н., Андросов И.М., Сахаров А.И. Морфология, деформации, временные изменения русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г. Якутска. *Геоморфология*. 2016, №3, с. 22-35. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2016-3-22-35>.
18. Чистобаев А.И., Висленева О.А. Есть ли в России дефицит территории для развития городов? *Региональная экология*, 2013, № 1-2 (34), с. 46-50.
19. Gautier E., Dépret T., Virmoux C., Grancher D., Brunstein D., Costard F., Fedorov A., Konstantinov P. Going with the flow: Hydrologic response of middle Lena River (Siberia) to the climate variability and change. *Journal of Hydrology*, 2018, Vol. 557, pp. 475-488, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.034>
20. Pavlova, N.; Ogonerov, V.; Danzanova, M.; Popov, V. Hydrogeology of Reclaimed Floodplain in a Permafrost Area, Yakutsk, Russia. *Geosciences* 2020, 10(5), 192; <https://doi.org/10.3390/geosciences10050192>
21. Tananaev N. Hydrological and sedimentary controls over fluvial thermal erosion, the Lena river, Central Yakutia. *Geomorphology*, 2016, 253, pp. 524-533, doi: 10.1016/j.geomorph.2015.11.009.
22. Shesternev D.M., Zhang R.V., Kuzmin G.P., Shepelev V.V., Pavlova N.A., Popenko F.E., 2014. Industrial and residential construction on hydraulic fill in permafrost regions; problems and prospects. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2014, №5 (3), 100–109.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА, СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ ПЕСЧАНИКОВ ШВЕНТОЙСКОГО ГОРИЗОНТА ВЕРХНЕГО ДЕВОНА

Е.Н. Самарин¹, И.В. Аверин², О.В. Зеркаль¹, М.С. Чернов¹, Е.В. Щепетова³

¹ Геологический факультет, Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, МГУ. E-mail: samarinen@mail.ru

² ООО «Инженерная Геология», 121552, Москва, ул. Ярцевская, д. 16/ E-mail: i.averin@mail.ru

³ ФГБУН ГИН РАН, 119017 Москва, Пыжевский пер, 7, стр.1. E-mail: shepetova.map@gmail.com

Свято-Успенский Псково-Печерский монастырь – один из самых крупных и известных в России мужских монастырей с многовековой историей (Рис. 1). Название монастыря связано с находящимися в нём пещерами, называемыми «Богом зданными» (созданными Богом), вырытыми монахами в борту крупного оврага в массиве песчаника. Для захоронения в стенах подземных коридоров издревле выдалбливались ниши, в нишу помещался гроб с телом, а отверстие закрывалось керамидой - керамической плитой с именем и годами жизни усопшего. Полная мумификация захороненных тел не наступает и останки в конечном счете разлагаются. Однако несмотря на значительное количество захоронений, воздух в пещерах чист, не ощущается ни малейшего запаха тления, даже от недавних захоронений [2]. Такие уникальные природные условия, с нашей точки зрения, обусловлены тремя факторами: геоморфологическими условиями территории, на которой был основан Свято-Успенский Псково-Печерский монастырь, геологическое строение верхней части земной коры и специфическими свойствами песчаников, в которых и были прорыты многочисленные пещеры.

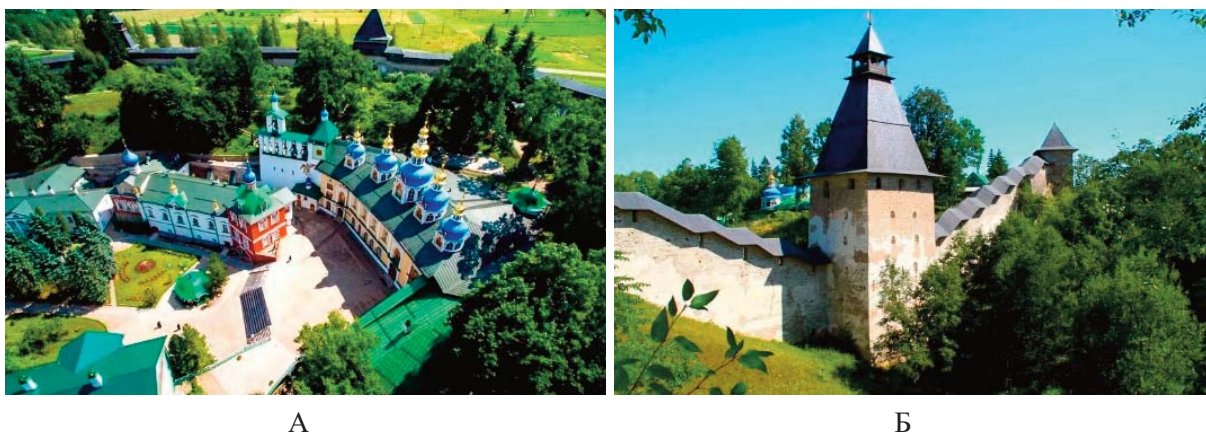
По преданию, пещеры стали известны местным жителям в 1392 г. В пещерах селились монахи, бежавшие в псковскую землю с юга, от набегов крымских татар. В 1473 г. здесь была освящена пещерная церковь Успения Божией Матери, выкопанная преподобным Ионой в холме из песчаника. Этот год считается годом основания монастыря. Холм (край моренной равнины, вычлененный системой современных пересекающихся оврагов), в котором находятся Успенская церковь и «Богом зданные» пещеры, называется Святой горой.

В 1541 г. игумен Корнелий поставил в монастыре трапезную церковь во имя Благовещения Пресвятой Богородицы, расширил Успенскую церковь, прокопал далее монастырские пещеры. При нём обитель превратилась в сильную крепость, вокруг монастыря были воздвигнуты каменные стены (1558—1565 гг.), которые служили его обороне более 150 лет – до заключения Ништадтского мира в 1721 г. За это время монастырь выдержал осады войск польского короля Стефана Батория (1581 г.), польских отрядов под командованием Я. Ходкевича и А. Лисовского и шведских войск короля Густава II Адольфа (с перерывами в 1611 – 1614 гг.), войск шведского короля Карла XII (в 1703 г.).

В 1758–1759 гг. над Успенским храмом была возведена Покровская церковь. В 1815–1827 гг. в память избавления Пскова от наполеоновских войск был сооружён Михайловский собор, в 1870 г. была устроена Сретенская церковь. Во время Второй мировой войны храмы монастыря пострадали от артиллерийских обстрелов, подверглись разрушениям, однако впоследствии были восстановлены в полном объеме.

Геоморфологические условия. Свято-Успенский Псково-Печерский монастырь находится в пределах города Печоры Псковской области. Архитектурный ансамбль монастыря расположен в крупном овраге, по тальвегу которого протекает ручей Каменец. Ручей заходит на территорию монастыря в зоне башни Верхних решеток (Рис. 1). Внутри территории монастыря ручей Каменец заключен в подземный коллектор, лоток которого расположен на глубине 2,0–2,5 м ниже уровня земли. Абсолютные высотные отметки русловой - 62,50–63,00 м. В развитии франской трансгрессии отчетливо выделяются четыре фазы. Первая, наиболее полная, проявилась в швентойское и саргавское (псковско-чудовское) время. Распространяясь с востока и юго-востока, море в это время охватило всю территорию Главного девонского поля [1].

Современный рельеф исследуемой территории является результатом длительного геологического развития от последевонского времени до наших дней. В дочетвертичное время основной



А

Б

Рис. 1. Псково-Печерский монастырь. А – обзорный вид на Успенско-Покровский храм; Б - Башня Верхних решеток. Левый борт ручья Каменец. Вид на Святую горку
(по: <https://putidorogi-nn.ru/evropa/700-svyato-uspenskij-pskovo-pecherskij-monastyr>).

формой рельефа рассматриваемой территории являлось Девонское плато, приуроченное к выходу на поверхность наиболее устойчивых пород – песчаников швентойского горизонта. Следующий этап развития рельефа происходит до наступления валдайского оледенения, либо на самой ранней его стадии. В этот период в западной части исследуемой территории формируется эрозионная палеоложбина, которая впоследствии заполняется песчано-глыбовым материалом. Направление ложбины – северное – северо-восточное, с азимутом около 5-10°. Правый борт ложбины расположен в зоне Собора Архангела Михаила с одной стороны оврага и западнее Успенского храма – с другой стороны (Рис. 2). Видимо, на этой же стадии, под воздействием прирусловых водных потоков, в этом же борту палеоложбины в результате эрозионных и суффозионных процессов происходит формирование пещер в массиве песчаников швентойского горизонта, часть из которых сохранилась до настоящего времени.



Рис. 2. Схематическая геологическая карта территории Псково-Печерского монастыря.

Цифрами обозначены: 1 – Петровская надвратная башня над святыми воротами; 2 - Надвратная церковь Святителя Николая Чудотворца; 3 - Собор Михаила Архангела; 4 - Успенско-Покровский храм; 5 – Сретенская церковь; 6 – Святая горка; 7 - Башня Верхних решеток.

Следующий этап развития рельефа связан с наступлением ледника, образованием верхневалдайского стадийного горизонта и последующим формированием холмисто-моренного рельефа в заключительной фазе валдайского оледенения. Местность в данном районе имела весьма пересеченный характер и представляла собой чередование отдельных холмов или их цепочек и понижений между ними. Моренные суглинки повсеместно перекрыли коренные девонские песчаники, а также

флювиогляциальные отложения, сформированные на ранних этапах валдайского оледенения, либо до его наступления.

Заключительный этап формирования рельефа развивается в голоцене. Под воздействием эрозионной деятельности водного потока – ручья Кременец – формируется флювиальный тип рельефа, происходит образование овражно-балочной сети практически в ее современном виде. Формирование современного оврага, расположенного в крест палеоложины, привело к обнажению ее сечения и прирусловых пещерных образований, которые, согласно преданию, в 1392 г. и дали начало монашеской жизни на территории монастыря (Рис. 3).

В настоящее время ширина оврага составляет 100–120 м, глубина – 16–18 м. Овраг простирается с юго-запада на северо-восток с азимутом 50-70°. Левый (северный) борт оврага имеет уклон от 30-33° у башни Верхних решеток, до 20° – у башни Нижних решеток. Максимальная крутизна левого склона до 43° зафиксирована в основании Собора Архангела Михаила, что обусловлено наличием крупноглыбового материала в его основании. Правый (южный) борт оврага имеет уклон от 20–25° у башни Верхних решеток, до 35–39° – от зоны пещер хозяйственного назначения до башни Нижних решеток. Существующий уровень нижней части оврага – искусственный, образован за счет заключения ручья Каменец в коллектор и подъем природного уровня тальвега оврага на высоту от 1,7 м у башни Верхних решеток до 3,5 м у башни Нижних решеток. Абсолютные высотные отметки рельефа в пределах исследуемой площадки составляют 67,10 – 91,25 м.

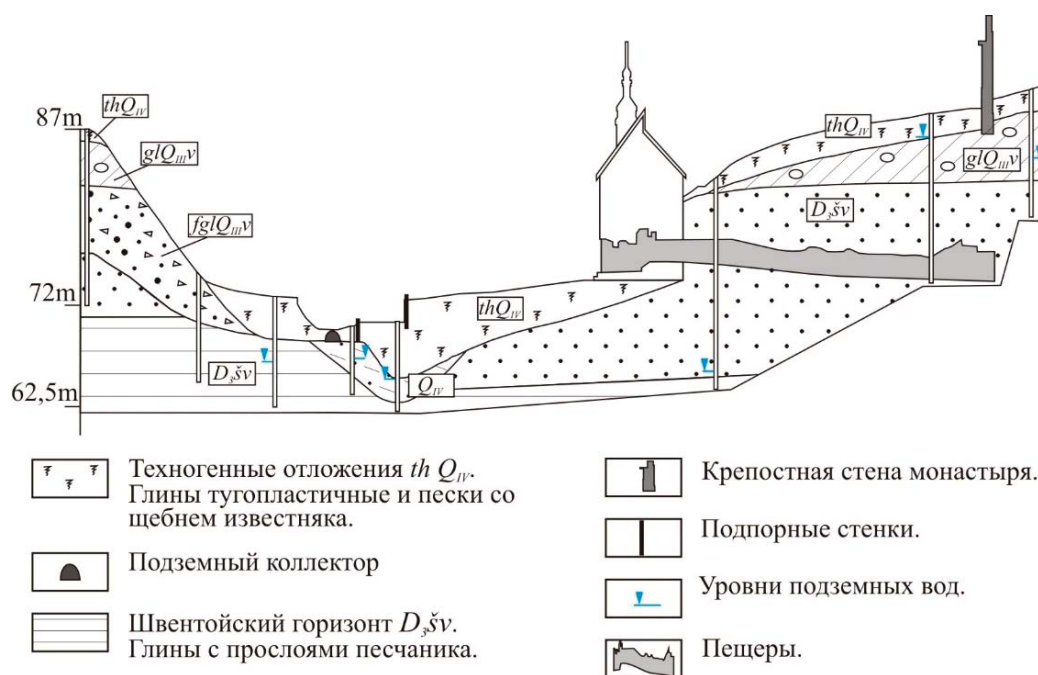


Рис. 3. Схематический геологический по линии Собор Михаила Архангела - Успенско-Покровский храм – пещеры монастыря. Другие обозначения на Рис. 2.

Геологическое строение. Отложения швентойской свиты (D_3sv) франкского яруса, к которым собственно и приурочены «Богом зданные» пещеры, вскрыты на территории монастыря и его окрестностей на глубине 1,4 – 13,0 м в верхней части оврага (за бровками склонов) и 2,7 – 5,0 м в его тальвеге (абс. отм 65,20 – 83,10м), и представлены: в нижней части глинами, а в верхней – песчаниками с тонкими, невыдержанными по простиранию прослоями глин. В целом толща швентойских отложений, характеризующаяся в долине р. Пачковка общей мощностью около 50 м, имеет грубую ритмичность, что явилось следствием пульсационного характера франкской трансгрессии. Даже кратковременные подъемы равнинной территории превращали ее в континентальную сушу. Периоды обводнения и осушения территории чередовались неоднократно, что и привело к накоплению ритмично построенной осадочной толщи [1].

Макроскопически глины плотные, имеют существенно пеструю окраску, от светло-зеленоватой до кирпично-красной, что обусловлено различным содержанием железосодержащих гематита

(2-4%) и сидерита (1-6%), и глинистых, преимущественно каолинита, хлорита и антигорита (минерал хлорит-серпентинового ряда). Кварц в составе преобладает, содержание его варьирует от 31-55% до 70% в песчаных разностях. Содержание калиевого полевого шпата и плагиоклазов не превышает 6%. Состав тонкодисперсной фракции глин - <0,001 мм постоянен: преобладает слюда 48-61%, каолинит 12-25% и смешаннослойные слюда-сметитового ряда с неупорядоченной структурой – 5-19%. Обращает на себя внимание высокое содержание гематита в глинистой фракции – 11-16%.

Под микроскопом у глин отчетливо диагностируется тонкая волнистая слоистость, обусловленная чередованием: светло-серой алевритовой глины с прослойками, обогащенными мелким растительным детритом, тонко отмученной коричневато-зеленой глины (гидрослюда и смешаннослойные) и средне-мелкозернистого песка.

Плотность глин 2,04 г/см³ при влажности 19,2 %, плотность скелета – 1,71 г/см³. Коэффициент фильтрации швентойских глин существенно меньше 0,001 м/сут, вследствие чего они играют роль локального водоупора, на поверхности которого формируется маломощный – первые десятки сантиметров – водоносный горизонт. Как следствие, описываемые глины ограничивают линейную овражную эрозию.



А

Б

Рис. 4. Слоистость в песчаниках швентойского горизонта (D₃šv): левое фото – обнажение в правом борту р. Пачковка, правое фото - в хозяйственной пещере монастыря.

Верхнюю часть разреза швентойского горизонта (D₃šv) составляют хорошо сортированные песчаники, макроскопически, от светло-розовых до расновато-коричневых, мелкозернистые, и среднезернистые, с линзовидной, перекрестной и косой слоистостью, с частыми прослоями маломощных глин, слабосцементированные, маловлажные. Характер слоистости очень хорошо виден в обнажениях (Рис. 4). Чередование линзовидной и косой слоистости обусловлено частой сменой обстановки осадконакопления. В гранулометрическом составе песчаников преобладают частицы размером от 0,1 до 0,5 мм, причем именно соотношение между мелким и средним песком в конечном счете определяет структуру породы.

Исследования под микроскопом показали (Рис. 5), что в разрезе отложений переслаиваются песчаники, различающиеся по зернистости, что также подчеркивает смену фациальной обстановки осадконакопления. Считается, что уменьшение зернистости песков последовательно наблюдается в пределах каждого трансгрессивного цикла от подошвы к кровле [1], а всего в разрезе швентойских отложений насчитывается до 4 циклов, мощностью от 3-8 до 10-12 м. Цемент в песчаниках может быть корковый, контактный или крустификационный.

Более точно тип контактных взаимодействий был исследован под электронным микроскопом (Рис. 6). Достаточно очевидно, что большинство контактов точечные, однако образованы в результате растворения первичного обломочного материала.

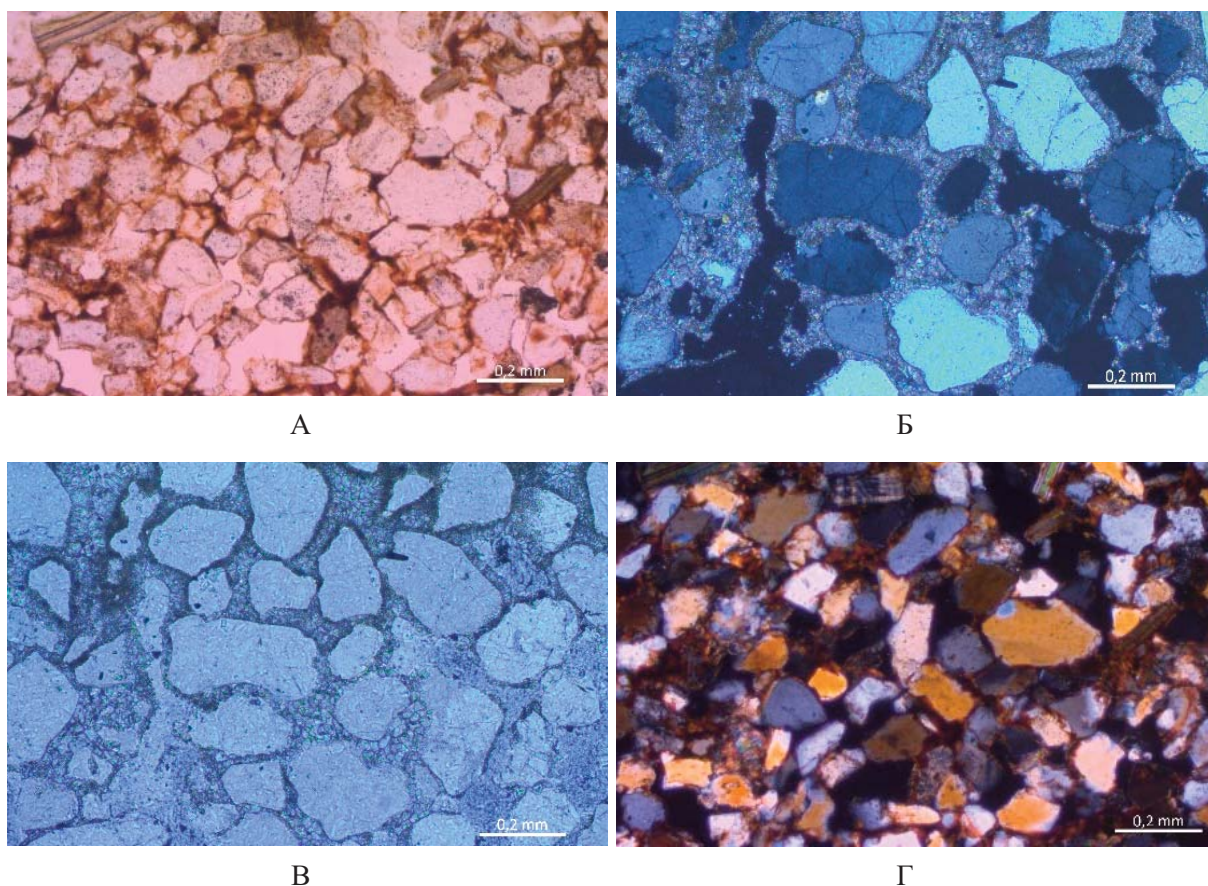


Рис. 5. Песчаник мелкозернистый алевритовый олигомиктовый кварцевый, слюдястый, с несплошным контурным железисто-глинисто-доломитовым цементом (глубина отбора 1,2 м): А – николи -; Б – николи +. Песчаник светлый (почти белый) средне-мелкозернистый, олигомиктовый кварцевый, с несплошным контурным и поровым крустификационным доломитово-кальцитовым цементом (глубина отбора 6,65 м): В – николи -; Г – николи +. Увеличение 50*.

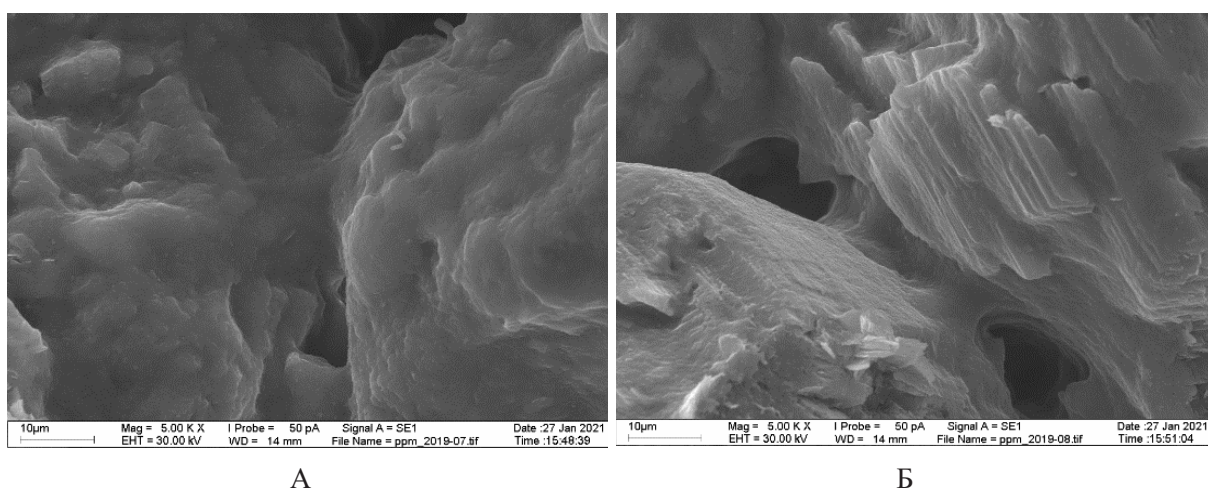


Рис. 6. Типы контактов в образце песчаника швентойского горизонта (D3šv), увеличение 5000*. А - Контакт между двумя зернами кварца. Б - Контакт зерна кварца и зерна КПШ (справа).

На фото Рис. 6А отчетливо видно, что на поверхности песчаных частиц образуется вторичная железисто-глинисто-силикатная пленка, за счет растворения первичных частиц и последующего осаждения на сильно корродированной поверхности минеральных зерен (Рис. 6А). Сформированная пленка сплошным слоем покрывает песчаные зерна и «как бы» переходит с одного зерна на другое. Так формируется большинство индивидуальных контактов в швентойских песчаниках.

Контакт между кварцевым зерном и сильно корродированной частичкой полевого шпата, показанный на Рис. 6Б, имеет совершенно другое строение. Закругленные края контакта по форме, отечающие мениску, предполагают, что такой контакт сформирован в результате конденсации вещества из порового раствора при высыхании мениска между двумя зернами. Таким образом, цементация предварительно осажденного мелкообломочного материала, происходила на стадии диагенеза, при фильтрации слабощелочных растворов, на что указывает характер поверхности как зерен кварца, так и зерен полевого шпата предполагает.

Песчаники швентойской свиты являются практически мономинеральными - содержание кварца колеблется от 90 до 95%. В качестве примесей из первичных минералов в незначительном количестве – первые проценты – присутствует роговая обманка (не более 1%), калиевый полевой шпат (1-6%), слюда (2-3%). Глинистые минералы в песчаниках представлены неупорядоченными смешанно-слоистыми минералами слюда-сметитового ряда (до 2%), каолинитом и хлоритом (следы). Аутигенные минералы (окислы железа, карбонаты) – не диагностируются. Глинистые минералы, видимо, выполняют роль цемента для мелких агрегатов – 1-2 мм в поперечнике, редко встречающихся в массиве.

Плотность песчаников составляет 1,72-1,74 г/см³, плотность скелета – 1,66-1,68 г/см³, что соответствует коэффициенту пористости 0,57-0,61. Влажность песчаников составляет 3,0-3,8%, степень водонасыщения – 0,13-0,16. Тем не менее в отдельных интервалах встречаются разности песчаников, характеризующихся значениями коэффициента пористости на уровне 0,78, что может быть связано со сосредоточенной фильтрацией и суффозионным разуплотнением.

Модуль общей деформации песчаников составляет 38-52 МПа, угол внутреннего трения 27-35°, сцепление 10-14 кПа. То есть, количества цемента недостаточно, для того, чтобы сформировать достаточную прочность породы. Именно этим объясняется как легкость естественного образования пещер в них (суффозионных?), так и простота устройства искусственных выемок.

Таким образом, на рассматриваемой территории сложились уникальные природные условия, которые отличаются следующими чертами. В бортах оврага, образованного ручьем Кременец залегает толща мелких кварцевых слабощементированных песчаников значительной мощности. Эти песчаники с поверхности надежно перекрыты малопроницаемым слоем плотных (плотность 2,10 г/см³) моренных суглинков, которые надежно защищают их от инфильтрации атмосферных осадков и препятствуют свободному проточному газообмену с атмосферой. Подземные воды залегают гораздо глубже тальвега оврага. Таким образом, весь массив песчаников, представляют собой замкнутое пространство, ограниченное мореной сверху и подземными водами снизу, с маловлажным воздухом, с температурой на уровне 4-6°C. Более того, нами установлено, что песчаники швентойской свиты содержат до 110-150 ppm (мг/кг) мышьяка, что на два порядка превышает кларковое содержание этого элемента в песчаниках, которое по А.А. Беусу составляет 1,0×10,0-4%. Возможно, именно высокие концентрации мышьяка в условиях маловлажной и холодной атмосферы и затрудненного газообмена, которые характерны для пещер-захоронений, играют решающую роль в подавлении процессов гниения в массиве песчаников. Однако, в случае локальных обрушений сводов пещер и свободного доступа атмосферного воздуха гниение начинает носить хорошо известные признаки. Такие обстоятельства диктуют необходимость бережного отношения к уникальному объекту, имеющему неопределимое культурно-историческое значение.

Заключение. Свято-Успенский Псково-Печерский монастырь является одним из самых крупных и известных в России мужских монастырей. История монастыря насчитывает около 550 лет и он до сих пор является предметом истового поклонения верующих. Главной достопримечательностью монастыря являются находящиеся в нём пещеры, называемые «Богом зданными». Образования пещер и их специфические свойства обусловлены уникальными природными условиями, главными из которых являются геологическое строение территории и история формирования рельефа.

До сих пор неизвестно точное расположение пещер, поскольку часть из них была обрушена как вследствие природных причин, так и в результате деятельности человека. Все-таки низкие прочностные характеристики песчаников, что вряд ли способствует длительному существованию в них открытых подземных выработок, лишенных внешнего крепления. Более того, естественное развитие природных экзогенных процессов также угрожает этому уникальному объекту. Тем большую значимость приобретают вопросы бережной рациональной эксплуатации монастырского комплекса сооружений, а перспективы развития Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря обязательно

должна опираться на грамотном всестороннем анализе геологических и геоморфологических условий территории.

Исследования проведены с применением оборудования, приобретенного в рамках реализации Программы развития Московского университета (растровый электронный микроскоп LEO 1450VP (Германия)).

Литература

- 1. Геология СССР. Том I. Центр Европейской части СССР. Под ред. А.В. Сидоренко. М., Недра, 1971. 504 С.*
- 2. Рязанцев С.В. Танатология – наука о смерти. М.: Восточно-Европейский институт психоанализа. 1994. - 336 С.*

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ ДРЕВНИХ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ г. БУХАРА

Н.Т. Таджибаева¹, Н.Г. Мавлянова²

¹Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека
Университетская улица д. 4, г. Ташкент, Узбекистан. E-mail: nadira.ruzievna@mail.ru

²Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия.
E-mail: georisk2015@mail.ru

Древний город Бухара, основанный более 2 тыс. лет назад, в настоящее время является административным центром Бухарской области Республики Узбекистан. На территории города располагаются 140 уцелевших памятников архитектуры. В 1993 г. исторический центр г. Бухары включен в Список мирового наследия ЮНЕСКО [9] как наиболее полный пример нетронутого средневекового азиатского города, сохранившего свой ландшафт до наших дней.

Изменение геологической среды урбанизированных территорий в аридной зоне имеют свои специфические особенности. Интенсивное промышленно-гражданское строительство в конце XX начале XXI вв., возрастание водопотребления и обводнения территории, особенно за счет поливных земель, окружающих г. Бухару, сильно нарушило равновесие, сложившееся в течение столетий между геологической средой и инженерными сооружениями. Влияние техногенного воздействия приводит к разрушению памятников архитектуры: ансамбль Чор-Бакр (XVI в.), Боло-Хауз (XVI-XIX вв.), медресе Кукельдаш (XVI в.), Мирзо Улугбека (XV в.), Чор-Минор (XIX в.), мавзолей Сайфиддина Бохарзий (XIII-VII вв.), мечеть Намазгох (XII-XVI вв.).

При реставрации и реконструкции памятников истории и архитектуры специалисты, зачастую, основной акцент делают на восстановление лишь внешнего вида исторических зданий, не уделяя должного внимания основной причине их разрушений – изменению геоэкологических условий. В результате отреставрированные сооружения через некоторое время вновь начинают деформироваться и разрушаться (Рис. 1). Рост количества деформаций уже отреставрированных памятников заставил обратить особое внимание на условия взаимодействия исторических сооружений с геологической средой. Статистика показывает, что более 70% деформаций памятников архитектуры, случаев аварийных ситуаций и разрушений связаны с причинами, возникающими в их подземной части.

Территория г. Бухары расположена в нижней, субаэральной дельтовой части долины р. Зарафшан, которая ограничена с северо-востока и востока Зирабулак-Зиаэтинскими низкогорными хребтами, с запада и северо-запада – песчаными массивами Кызылкумов. Поверхность дельты долины р. Зарафшан представляет слабоволнистую аллювиальную и аллювиально-пролювиальную равнину с общим уклоном на юго-запад, в сторону течения реки. Абсолютные отметки территории города – 220-231 м.

В геологическом строении города выделяются породы мезо-кайнозойского возраста, залегающие на палеозойском основании. В пределах г. Бухары с поверхности наибольшее распространение имеют четвертичные отложения, залегающие в виде относительно небольшого покрова (6–30 м) на размытой, неровной поверхности неогеновых отложений и сложены аллювиальными и аллювиально-пролювиальными отложениями дельтовой части долины р. Зарафшан. Их литологический состав представлен песками, лессовидными супесями, суглинками, галечниками, гравийно-галечниковыми отложениями и антропогенными грунтами, образовавшимися в результате инженерно-строительной и хозяйственной деятельности (насыпные строительные отложения древней и современных застроек, оборонительных и военно-крепостных сооружений, отложениями каналов, арыков и др.).

Современный рельеф территории г. Бухары сформировался в конце неогена – начале четвертичного периода под влиянием тектонических и экзогенных факторов. Четвертичные тектонические движения с небольшими амплитудами выразились в рельефе в виде террас и слившихся конусов выноса на фоне неогеновых равнин и платообразных поднятий. В пределах города и прилегающей территории выделяются два генетических типа рельефа: аккумулятивно-дельтовый и эрозионно-аккумулятивный. Поверхность всех форм рельефа изменена вследствие инженерно-хозяйственной деятельности человека (антропогенный тип рельефа), осложнена сетью каналов, арыков, коллекторов. Большинство памятников архитектуры г. Бухары расположено в его древней



Рис. 1. Пример деформации реставрированного памятника архитектуры. Стена мечети Калян, главной действующей мечети г. Бухара (XV в.).

центральной части, преимущественно на поверхности третьей надпойменной террасы, плоской аллювиальной равнине.

Город Бухара представляет собой оазис в непосредственной близости от песчаного массива Кызылкумы. Грунты, слагающие исследуемую территорию до разведанной глубины 25,0 м, имеют четвертичный и неогеновый возраст. Их можно разделить на семь стратиграфо-генетических комплексов, имеющих не только разный возраст, генезис, но и литологический состав, а следовательно, и разные свойства: 1) почвенно-растительный слой (prQIV), мощностью от 0,5 до 1,0 м; 2) антропогенные отложения (antQIV), мощностью 2,0–20,0 м; 3) лессовидные суглинки и супеси (aQIV) от твердой до текуче пластичной консистенции, мощностью 12,0–34,3 м; 4) лессовидные суглинки и супеси (aQIII) от полутвердой до текучей пластичной консистенции, мощностью 0,5–4,2 м; 5) пески (aQII) мелкозернистые и пылеватые, мощностью 0,2–8,0 м; 6) галечники, гравий (a,rQII), мощностью 0,5–60,0 м; 7) песчаники, алевролиты, гравелиты вскрытая мощность 16,5 м.

В пределах древней части г. Бухары широко развиты антропогенные грунты, связанные с многообразной инженерно-хозяйственной деятельностью. Среди них наиболее распространены насыпные грунты, представленные суглинисто-супесчаными образованиями с включениями обломков кирпича, камня, золы, древесины и др. [2, 3]. В вертикальном разрезе антропогенной толщи выделены 5 слоев, залегающих в хронологической последовательности (табл. 1). Возраст нижнего, наиболее древнего слоя, по данным археологических исследований составляет более 2 тыс. лет. Антропогенные грунты характеризуются значительной изменчивостью состава и свойств как по площади, так и с глубиной. В гранулометрическом составе основной массы отмечается достаточно высокое содержание песчаных фракций, которое колеблется от 21 до 71%, в среднем 41%. На долю пылеватых фракций приходится от 26 до 64%, в среднем 47%. Содержание глинистой фракции составляет от 3 до 24%, в среднем 12%. Количество водорастворимых солей относительно высокое. Величина плотного остатка водной вытяжки составляет 0,2–2,75%, в среднем 1,10% от веса сухого грунта. В химическом составе водной вытяжки преобладающими анионами являются SO_4^{2-} и Cl^- . Грунты в соответствии с [1] относятся к категории засоленных.

Естественная влажность грунтов изменяется от 14,6 до 26,5% (в среднем 20,5%), плотность — от 1,70 до 1,95 г/см³ (в среднем 1,74 г/см³), коэффициент пористости — от 0,639 до 0,916 (в среднем 0,778). Грунты обладают высокой сжимаемостью, коэффициент сжимаемости при внешней нагрузке $P = 0,3$ МПа колеблется от 0,006 до 0,124 МПа⁻¹, в среднем 0,043 МПа⁻¹. Они относятся к средне- и сильносжимаемым грунтам. Модуль общей деформации грунтов изменяется от 5,5 до 10,1 МПа, при нормативном значении 6,0 МПа. Просадочность грунтов невысокая, при $P = 0,3$ МПа коэффициент относительной просадочности составляет 0,001–0,044, в среднем 0,011 [4].

Описание слоёв, выделенных в антропогенных грунтах (вертикальный разрез древней части г. Бухара)					
№	Литологический состав	Состав включений	Общее содержание включений %	Сложение	Водо-насыщенность
1	суглинки и супеси серые	обломки жженого кирпича, керамика, галька, гравий, погребенный асфальт, древесина, ганч (глиногипс)	20 - 40	изменчивое	-
2	супесижелтовато-серые		10 - 30	рыхлые	влажные
3	суглинки серые		10 - 20	местами уплотненные	влажные
4	супеси, в основании слоя преобладают болотистые темно-серые супеси		5 - 10	уплотненные	водонасыщенные
5	суглинки темно-серые, местами до черных, с прослоями мелкозернистого песка, встречаются обломки керамики		5	уплотненные, слоистые	водонасыщенные

Таблица 1.

При уже отмеченной высокой пространственной изменчивости условий залегания, состава и свойств антропогенных грунтов с глубиной в них отмечается уменьшение содержания включений и увеличение однородности и плотности сложения. Важной особенностью является изменения геологического строения в городской черте, связанное с накоплением толщи антропогенных отложений различного состава, строения, состояния и свойств. Наблюдается общее увеличение их мощности от периферии к центру города от 1 до 20 м. Здесь же отметим, что за счет веса покровных антропогенных грунтов, а также веса зданий и сооружений произошло существенное увеличение статической нагрузки на верхние слои природных глинистых грунтов. Выявлена общая тенденция техногенных изменений грунтов за период 2000–2017 гг., которая заключается в повышении их засоленности (в среднем на 1,0–1,5%), влажности (в среднем на 8–9%), понижении пористости (в среднем на 1–3%) и прочности при избыточном увлажнении. Подобные изменения распространяются почти на всю мощность четвертичных отложений (6–30 м).

Среди компонентов инженерно-геологических условий в наибольшей степени изменены подземные воды, что, в свою очередь, привело к изменению свойств грунтов и спровоцировало проявление неблагоприятных геологических процессов. Повсеместно отмечается подъем уровня грунтовых вод. Подтопление стало самым распространенным процессом на исследуемой территории. Учитывая среднюю глубину заложения фундаментов зданий и сооружений при наземном строительстве (в старой части города до 2 м) и высоту капиллярного поднятия воды в суглинках и супесях в зоне наибольшего увлажнения (около 1 м), для г. Бухары определено критическое значение УГВ — выше 3 м [5]. По степени подтопления в пределах города выделены четыре типа участков: 1) очень сильное подтопление (УГВ на глубине 0–1 м); 2) сильное подтопление (УГВ на глубине 1–2 м); 3) умеренное подтопление (УГВ на глубине 2–3 м); 4) неподтопленные (УГВ на глубине более 3 м).

Дополнительным фактором, влияющим на состояние памятников, является конденсация влаги в зоне аэрации в результате того, что поверхность перекрывается асфальтом, бетоном, кирпичом, булыжной отмосткой, плитами и т.д. [8]. Кроме того, температура воздуха внутри зданий обычно ниже, чем снаружи. В большинстве памятников архитектуры, расположенных в «старом городе», отмечено увлажнение и засоление стен, что является одной из основных причин, вызывающих разрушение (выветривание) кирпича, строительного раствора и бутового камня [6, 7].

В результате проведенных исследований состояния застройки исторического центра г. Бухары позволило выделить ряд инженерно-геологических особенностей, влияющих на их сохранность. В основании всех памятников залегают насыпные грунты, в основном, неоднородные, нередко просадочные, усадочно-набухающие, засоленные мощностью от 0,5–5,0 м до 15,0–20,0 м. В условиях подтопления несущая способность этих неустойчивых грунтов еще больше снижается, что может повлиять на сохранность сооружений. Особенно опасна неравномерная осадка зданий на избыточно увлажненном основании, вызвавшая деформации таких ценных объектов как мавзолей Самоний, Бохарзий, Мирзо Улугбек, медресе Кукельдаш и др.

Неоднородность состава и неблагоприятные деформационно-прочностные свойства антропогенных отложений, практически повсеместное увлажнение грунтов оснований сооружений и засоление являются главными причинами, влияющими на сохранность памятников истории и архитектуры. Данное положение необходимо учитывать при разработке проектов реставрации или реконструкции и при планировании мероприятий по инженерной защите сооружений всемирного наследия в древнем городе Бухара.

Литература

1. Сорочан Е.А., Михеев В.В., Вронский А.В. *Руководство по проектированию оснований зданий и сооружений*. М., Стройиздат, 1978
2. Таджибаева Н.Р. *Возрастные и генетические типы пород г. Бухары и их инженерно-геологические характеристики // Вестник НУУз. 2015, N 3, с. 150-154*
3. Таджибаева Н.Р. *Инженерно-геологические условия г. Бухары и составление карты инженерно-геологического районирования// Мат-лы Межд. науч.-практ. конф. «Влияние природных глобальных изменений и техногенных условий на гидрогеологические, инженерно-геологические и геоэкологические процессы: анализ результатов и прогнозирование развития». Ташкент, ГП «Институт ГИДРОИНГЕО», 2018, с. 155-158.*
4. Таджибаева Н.Р., Мавлянова Н.Г. *Инженерно-геологические условия г. Бухары и их влияние на сохранность древних памятников архитектуры// Инженерная геология. 2021. N 1, с. 50-63*
5. Шерматов М.Ш., Таджибаева Н.Р. *Регулирование режима грунтовых вод в геологической среде основания фундаментов исторических памятников// Экологический вестник. 2012. N 4, с. 52-57*
6. Legg, R. and Myers, R. *Salt damage to important Islamic Monuments at Bukhara and Khiva. Proceedings of the regional workshop "Ground water and soil salinity related damage to the monuments and sites in Central Asia". Samarkand/Bukhara, (edited by B. Lane and B. Usmanov), Uzbekistan 2000, UNESCO, Tashkent, pp. 61–91.*
7. Mavlyanova, N.G., Ismailov, V.A. *Influences of human activity on deformations of the ancient structures of Ichan-Kala in Khiva City // Geotechnical and Geological Engineering. 2004, N 22, pp. 135–150. <https://doi.org/10.1023/B:GEGE.0000014284.46858.a>*
8. Mavlyanova N.G. *Engineering Geology Problems and Seismic Vulnerability of Ancient Structures in Central Asia. In: Lollino G., Giordan D., Marunteanu C., Christaras B., Yoshinori I., Margottini C. (eds)// Engineering Geology for Society and Territory 2015. Volume 8. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09408-3_26*
9. *UNESCO World Heritage list <https://whc.unesco.org/en/list/602/>. (accessed: 20 October 2021).*

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БАЗАЛЬТОВ ВУЛКАНА ТОЛБАЧИК

Ю.В. Фролова, Г.З. Зарипова, И.Е. Большаков, В.М. Ладыгин

Геологический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, 199234, ГСП-1, Ленинские Горы, 1.
E-mail: ju_frolova@mail.ru

Вулканы Острый и Плоский Толбачики, и примыкающая к ним с юга региональная трещинная зона шлаковых конусов («Толбачинский дол»), являются крупнейшими вулканическими постройками юго-западного сектора Ключевской группы вулканов. Толбачинские вулканы хорошо известны в связи с испытаниями луноходов и других космических аппаратов, которые неоднократно проводились на лавовых полях, начиная с 1969 г.

В работе рассматриваются инженерно-геологические особенности базальтов различных извержений вулкана Толбачик. Образцы были отобраны в 2020 г. в ходе совместных экспедиционных работ с Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (начальник отряда М.А.Назарова). На Рис. 1 представлена схема отбора образцов.

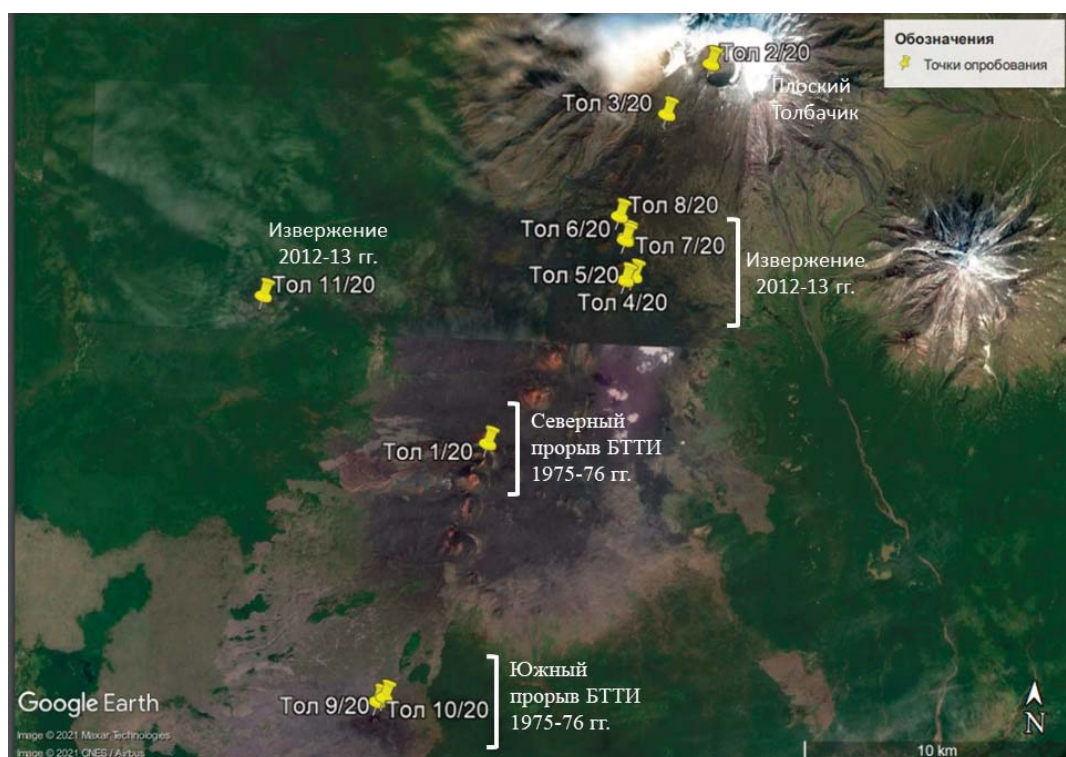


Рис. 1 Точки отбора образцов (2020 г.).

Лабораторные исследования проводились по стандартным методикам в соответствии с [1,5] и включали петрографическое описание и определение ряда показателей физических, прочностных и деформационных свойств.

Физические и физико-механические свойства базальтов

Плотность твердых частиц. Все исследованные базальты характеризуются высокими значениями плотности твердых частиц $\rho=2,84-3,07$ г/см³, что согласно [3] находится в соответствии с основным составом вулканитов.

Плотность, пористость и прочность. Одной из характерных инженерно-геологических особенностей базальтов является крайне широкий диапазон изменения пористости ($n=7-63\%$) и плотности ($\rho=1,01-2,75$ г/см³), что в свою очередь обуславливает значительные вариации прочности ($R_c=2-187$ МПа). Пористость является основным фактором, влияющим на прочность базальтов, что

подтверждается тесной корреляционной связью между данными параметрами (Рис. 2а). При близких значениях пористости на прочность оказывает влияние морфология порового пространства - размер пор и их распределение в объеме породы.

Вместе с тем, при пористости менее 15-20% повышается роль структурного фактора. Наиболее прочными ($R_c=178-187$ МПа) являются однородные афировые базальты с интерсертальной структурой основной массы, а минимальной прочностью ($R_c=62-79$ МПа) обладают базальты с гиалопилитовой структурой и крупными порфирированными вкрапленниками, которые нарушают однородность породы, создавая дополнительные напряжения при ее нагружении, а кроме того, содержат различные дефекты (микротрещины различного происхождения, включения вулканического стекла, газово-жидкие включения, зональное строение и пр.), ослабляющие породу. Разброс значений прочности для массивных базальтов составляет более 100 МПа в зависимости от структурных характеристик (Рис. 2а).

Сейсмоакустические и деформационные свойства. В изменении показателей сейсмоакустических и деформационных свойств для большей части образцов наблюдается стандартная закономерность их увеличения с повышением плотности и снижением пористости: при пористости более 40% скорость распространения продольных волн V_p составляет $\sim 2-3$ км/с, а при пористости менее 15%, $V_p \sim 5-6$ км/с (Рис. 2б).

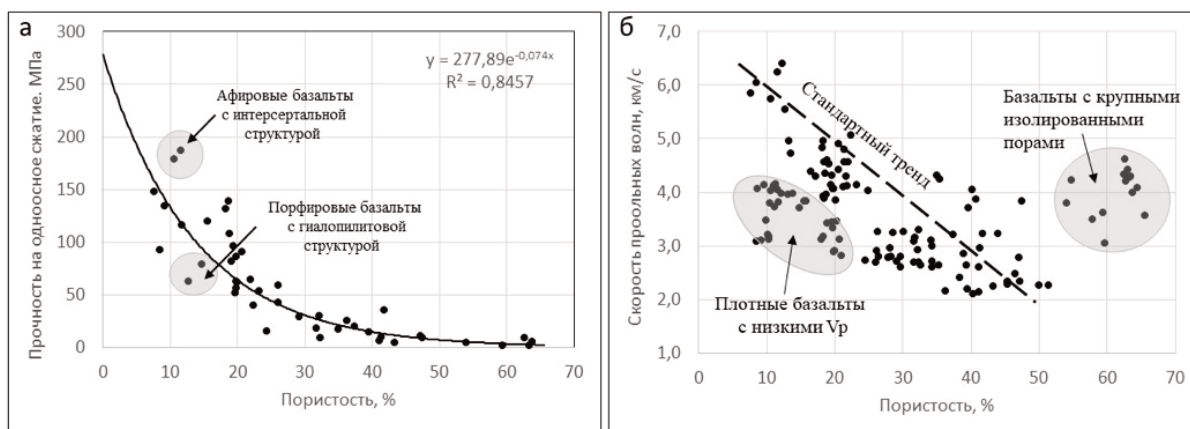


Рис. 2 Зависимость прочности на одноосное сжатие (а) и скорости распространения продольных волн (б) базальтов от пористости.

Однако обнаружен ряд образцов, не подчиняющихся общему тренду и образующих две принципиально разные группы (Рис. 2б). Первую группу составляют пористые базальты с крупными газовыми пустотами, которые несмотря на высокую пористость ($n > 30-40\%$) и низкую плотность ($1,0-1,7$ г/см³) характеризуются относительно высокими значениями скоростей упругих волн ($V_p \sim 3,5-4,5$ км/с). Обычно такие породы локализованы в верхних частях лавовых потоков, где происходит интенсивная дегазация при их остывании. Образующиеся крупные поры являются изолированными, имеют округлую форму, их стенки выстланы вулканическим стеклом (Рис. 3а). В результате, они не являются существенным препятствием на пути упругих волн, которые свободно распространяются по «скелету» породы.

Во вторую группу, напротив, входят плотные базальты ($n < 15\%$, $\rho > 2,5$ г/см³) с аномально низкими значениями скоростей упругих волн ($V_p \sim 3-4$ км/с). Как правило, эти базальты слагают центральные и нижние части лавовых потоков. Основной причиной низких значений скоростей упругих волн, по-видимому, является микротрещиноватость, обнаруженная в образцах базальтов, насыщенных люминофором, при изучении на флуоресцентном микроскопе. Ранее подобное явление было описано для голоценовых и верхнеплейстоценовых базальтов различных вулканов мира и связывалось с микротрещиноватостью [3,4,8], микропористостью [7] или обоими факторами [6].

Интересная закономерность обнаружена для коэффициента Пуассона (μ). В общем случае, он заметно выше у плотных базальтов ($\mu=0,32-0,33$) по сравнению с пористыми разностями ($\mu=0,16-0,21$). Это вполне закономерно, так как при деформировании плотных пород в образце развиваются значительные поперечные деформации и преобладает процесс формоизменения, а деформирование

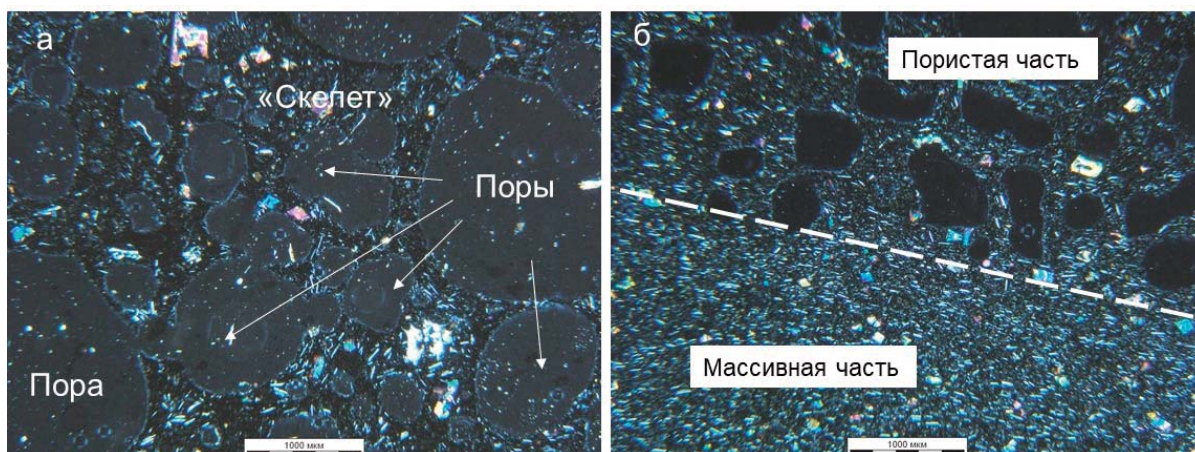


Рис. 3 Пористая и массивная текстура базальтов: а - крупные округлые изолированные поры в верхней части лавового потока; б - граница пористой и массивной частей (микрофотографии шлифов при скрещенных николях).

пористых разностей в основном происходит за счет сокращения размера образца вдоль приложения нагрузки, тогда как поперечные деформации при этом менее значительны.

Следует отметить, что у двух ранее выделенных групп базальтов, выделяющихся среди общей выборки по соотношению плотности и сейсмоакустических свойств, имеется своя специфика в отношении коэффициента Пуассона: у пористых базальтов с высокими значениями V_p (первая группа) коэффициент Пуассона повышается до 0,28, а у плотных базальтов с низкими V_p (вторая группа), он напротив снижается до 0,22-0,27.

Свойства базальтов из лавовых потоков различных морфологических типов

Установлено, что базальты, слагающие лавовые потоки различных морфологических типов (Рис. 4а), отличаются по инженерно-геологическим характеристикам. Выявлен обобщенный ряд базальтов по мере увеличения показателей плотностных, прочностных и деформационных свойств в зависимости от принадлежности к определенному морфологическому типу лавового потока: пахоэхоэ → подушечные лавы → канатные лавы → АА-лавы (обломочные) (табл.1).

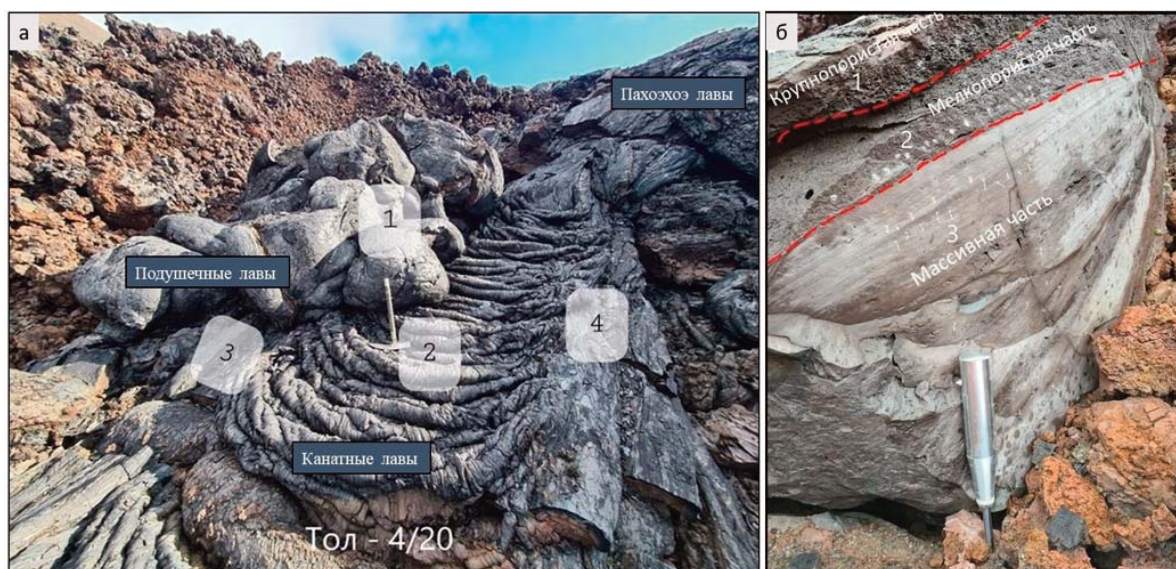


Рис. 4. Различные морфологические типы лавовых потоков: а – пахоэхоэ (подушечные и канатные лавы) (2013 г.); б – лавовый поток в разрезе (БТТИ 1975-76 гг.). Цифрами на Рис. 4 а обозначены: 1 – подушечные лавы, 2 – канатные лавы, 3-4 – пахоэхоэ лавы.

Канатные и АА-лавы близки по большинству показателей свойств, за исключением плотности твердых частиц, которая заметно выше у первых, и магнитной восприимчивости, которая напротив

у них существенно ниже. Поскольку эти показатели отражают химический состав пород, то по-видимому, существуют различия в составе двух типов лав. Максимальной пористостью и минимальными значениями свойств обладают базальты из потоков пахоэхоэ, образующих ровные или волнистые поверхности. Подушечные лавы занимают промежуточное положение, причем в пределах одной «подушки» наблюдается дифференциация по свойствам: центральная часть более плотная, прочная и менее пористая по сравнению с краевой зоной.

<i>Таблица 1.</i>					
Средние значения показателей свойств базальтов лавовых потоков различных морфологических типов					
Тип потока Показатель свойств	Пахоэхоэ (ровная волнистая поверхность)	«Подушка» (край)	«Подушка» (центральная часть)	«Канаты»	АА-лава
ρ , г/см ³	2,15	2,24	2,44	2,43	2,46
ρ_s , г/см ³	2,91	2,97	2,97	2,95	2,88
n, %	26	24	18	18	15
Магнитная восприимчивость χ 10 ⁻³ СИ	16	13	17	12	45 (19-96)
V_p , км/с	2,95	4,3	3,95	4,85	4,65
Един, ГПа	17	36,1	29,2	42,9	40,6
μ , д.ед.	0,21	0,22	0,28	0,29	0,29
R_c , МПа	52	59	115	132	100
Кол-во проб	19	6	8	6	13

Изменение свойств по разрезу лавового потока

В разрезе лавовых потоков, как правило, выделяется верхняя пористая часть, образующаяся при активной дегазации лавы, иногда состоящая из нескольких слоев, отделенных друг от друга, центральная часть, которая может быть как массивной, так и пористой, и нижняя массивная часть (Рис. 4 б).

<i>Таблица 2.</i>				
Свойства базальтов в зависимости от положения в разрезе лавового потока (Северный прорыв БТТИ 1975-76 гг.)				
Положение в потоке Показатель свойств	Верхняя пористая часть (1)	Верхняя пористая часть (2)	Средняя массивная часть (3)	Нижняя массивная часть
ρ , г/см ³	1,04-1,1	1,76	2,72-2,74	
ρ_s , г/см ³ (сред)	2,92	2,97	3,07	
n, %	62-64	40-41	8-11	
Магнитная восприимчивость χ 10 ⁻³ СИ (сред)	11,2	18,7	34	44
V_p , км/с	4,0-4,6	3,7-4,1	5,7-6,1	3,7-4,1
Един, ГПа	12,0-16,9	16,7-22,2	62,3-68,0	33,0-38,7
R_c , МПа	6-9	14	144	178
Кол-во проб	6	3	3	4

По разрезу лавового потока (снизу вверх) увеличивается пористость - от менее 8-11% в нижней части до 60% и более в кровле, и соответственно снижаются плотность и прочностные характеристики. Исключением из общей закономерности являются сейсмоакустические свойства, причины данного явления были рассмотрены выше (табл.2).

Граница раздела массивной и пористой частей потока обычно резкая, без плавных переходов, что хорошо определяется визуально (Рис. 4б) и подтверждается микроскопическими исследованиями (Рис. 3б).

В разрезе разные потоки наслаиваются друг на друга, образуя «слоеный пирог», в котором чередуются пористые и массивные горизонты с соответствующими изменениями свойств.

Заключение

Исследования инженерно-геологических особенностей базальтов различных извержений вулкана Толбачик позволили сделать следующие выводы:

Базальты, в зависимости от положения в потоке, характеризуются широким разбросом величины пористости, которая, в свою очередь, определяет прочностные свойства пород, варьирующие в пределах двух порядков значений.

Влияние структурного фактора проявляется при пористости менее 15-20% и выражается в высокой прочности афировых базальтов с интерсертальной структурой и существенно меньшей прочности порфировых разностей с гиалопилитовой структурой.

В изменении показателей сейсмоакустических и деформационных свойств для большей части образцов установлена стандартная закономерность в зависимости от плотности и пористости, однако обнаружен ряд образцов, не подчиняющихся общему тренду и образующих две принципиально разные группы – пористые базальты с высоким скоростями упругих волн, и напротив, плотные породы, с аномально низкими значениями V_p , V_s . Показано, что коэффициент Пуассона заметно выше у плотных базальтов по сравнению с пористыми разностями.

Выявлен обобщенный ряд базальтов по мере увеличения показателей плотностных, прочностных и деформационных свойств в зависимости от принадлежности к определенному морфологическому типу лавового потока: пахоэхоэ → подушечные → канатные → АА-лавы.

Лавовые потоки в разрезе имеют зональное строение: выделяется пористая верхняя часть, массивная или пористая центральная часть и массивная нижняя часть, в соответствии с которыми изменяются плотность и прочностные характеристики базальтов.

Литература

1. *Лабораторные работы по грунтоведению: уч. пособие / Под ред. В.Т.Трофимова и В.А.Королёва, изд. 3-е испр. и доп. М.: КДУ. 2017, 654 с.*
2. *Ладыгин В.М., Макаров А.А., Фролова Ю.В. Использование показателя плотности твердой фазы для классификации эффузивов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2002. № 1, С. 57-60.*
3. *Ладыгин В.М., Никитин В.Н. О некоторых особенностях свойств молодых эффузивов Камчатки // Вестник Московского Университета. Сер. 4. Геология. 1980. № 5, С. 81-86.*
4. *Ладыгин В.М., Фролова Ю.В., Спиридонов Э.М. О явлении аномально низких значений скоростей продольных волн современных базальтоидов // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2018. Т. 37. № 1, С. 20-31.*
5. *Фролова Ю.В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения. М.: КДУ. 2015, 222 с.*
6. *Pappalardo G., Punturo R., Mineo S., Contrafitto L. The role of porosity on the engineering geological properties of 1669 lavas from Mount Etna // Engineering Geology. 2017. V. 221, P. 16-28.*
7. *Sigurdsson O., Gudmundsson A., Fridleifsson G.O. et al. Database on igneous rock properties in Icelandic geothermal systems. Status and unexpected results // Proceedings World Geothermal Congress. Kyushu - Tohoku, Japan. 2000. V. 1, P. 2881-2886.*
8. *Vinciguerra S., Trovato C., Meredith P.G., Benson P.M. Relating seismic velocities, thermal cracking and permeability in Mt. Etna and Iceland basalts // International Journal of Rock Mechanics & Mining Science. 2005. V. 42, P. 900-910.*

РАЗВИТИЕ НЕРАВНОМЕРНЫХ ОСАДОК ИСААКИЕВСКОГО СОБОРА

А.Г. Шашкин, В.А. Васенин

Институт «Геореконструкция», Санкт-Петербург, Измайловский пр., 4.
E-mail: 9563513@gmail.com

Исаакиевский собор – крупнейший православный храм в мире, построенный 170 лет назад, гордость и украшение Санкт-Петербурга. И все эти годы продолжаются неравномерные осадки грандиозного сооружения.

Авторы публикации преследуют скромную цель: дополнить имеющуюся информацию об истории деформирования памятника результатами сравнительно недавних геодезических измерений. Но для того, чтобы новые результаты органично вошли в копилку данных, необходимо хотя бы кратко ознакомиться с историческим контекстом.

Для этого воспользуемся такими историческими источниками как «Журнал комитета для рассмотрения замечаний архитектора Модюи на строительные работы Исаакиевского собора», книга Н.П.Никитина [3], а также сохранившимися в архивах запиской Н.У.Малеина «Фундаменты и свайное основание Исаакиевского собора (опыт критической оценки и их устройств)», написанной в 1947 г. и отчетом Ленинградского политехнического института (ЛПИ), написанным в 1954 г. под руководством В.А.Флорина и Д.М.Тартаковского.

1. Краткий исторический экскурс по строительству

В истории строительства существующего храма можно выделить три этапа. *Первый этап* относится к возведению так называемого Третьего Исаакиевского собора, начатого по проекту А.Ринальди и оконченного по проекту В.Бренна (первые два собора петровского времени не имеют отношения к истории строительства существующего сооружения – они стояли примерно на месте Медного всадника). Собор никак не соответствовал замыслу Александра I превратить Санкт-Петербург в самую красивую столицу Европы. Задание на проектирование нового собора содержало требование о перестройке ринальдиевской церкви, с максимальным использованием частей старого здания.

На сохранившемся чертеже свайной бойки и фундаментов, разработанном Ринальди, подкупольные пилоны основывались на сваях длиной 5 саж. (10,65 м), все остальные сваи были по 4 саж. (8,52 м). Среднее расстояние между осями свай составляло 62 см. Верхушки свай были срублены на глубине 3,65 м от поверхности земли.

Второй этап истории начался с одобрения императором первоначального проекта О.Монферрана, по которому предполагалось Исаакиевский собор против первоначального плана Ринальди увеличить на третью часть. Над собором, согласно с первоначальным планом, планировалось устроить величественный купол, окруженный четырьмя меньшими. Предполагалось сохранение четырех пилонов, поддерживающих центральную главу, и всех стен кроме западной и колокольни, полукруглые выступы с трех сторон строения Ринальди разбирались (Рис. 1) [3].

Руководство строительством собора возлагалось на замечательного испанского инженера А.Бетанкура, основателя российской инженерной школы, поскольку имелось некоторое недоверие к строительному опыту Монферрана. Однако занятость Бетанкура другими поручениями не дала ему возможности погрузиться полностью в проектирование собора. Бетанкуру мы обязаны, прежде всего, разработкой метода подъема гранитных колонн на портики и подкупольный барабан. В остальном он оставался, скорее, консультантом своего протеже (именно Бетанкур представил Монферрана императору).

Весной 1818 г. начались работы по разборке стен старой церкви, возведению подсобных строений, земляные работы, отлив воды из котлованов. Однако в сентябре 1821 г. строительство было остановлено, основанием чего послужила записка А.А. Модюи, заставившая пересмотреть весь проект заново. Этим делом занялся специально организованный комитет, в который вошли лучшие российские архитекторы.

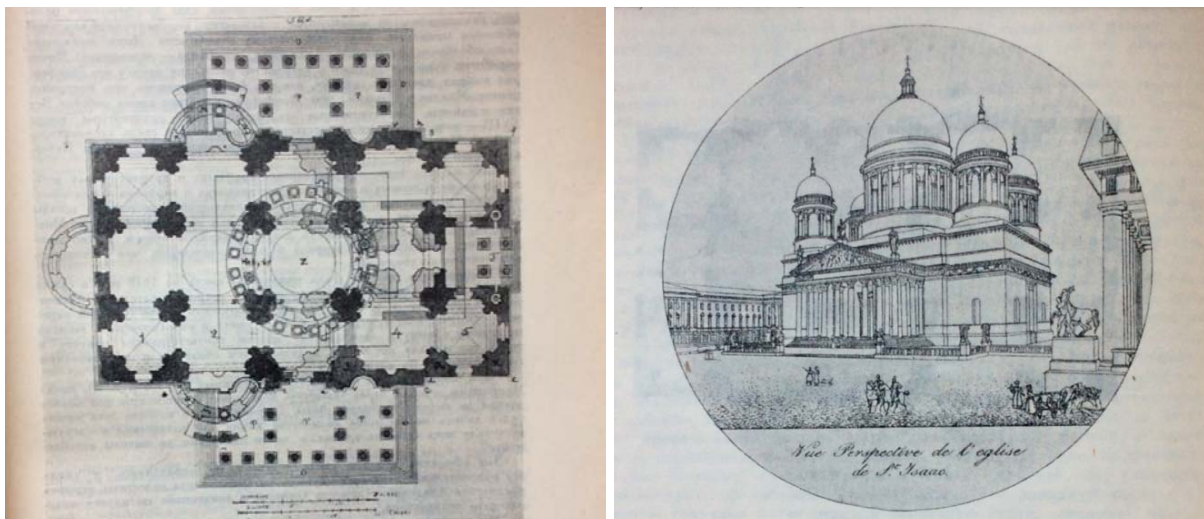


Рис. 1. План и вид Исаакиевского собора по проекту Монферрана, утвержденному в 1818 г. (план совмещен с планом собора Ринальди) [3].

Как следует из протоколов его заседаний, главный недостаток проекта оппонент видел в том, что «по сделанному г-ном Монферраном плану и принятого в исполнение оною способом почти нет возможности оставить ныне существующие четыре столбища, поддерживавшие прежний кирпичный фонарь с куполом, ... что новый фонарь с куполом должен быть воздвигнут на двух старых и двух новых столбищах, которые будут иметь неодинаковую осадку».

Члены комитета согласились с Модюи в том, что «для прочности и безопасности лучше все четыре столбища, долженствующие поддерживать каменный фонарь с куполом, сделать новые».

Ответы Монферрана об устройстве новых фундаментов собора служат весьма ценной информацией о работах, выполненных до изменения проекта (поскольку проектная документация в этот период Монферраном надлежащим образом не оформлялась, разработку достаточно детальной «рабочей» документации на последующем этапе работ следует отнести к положительным результатам работы комитета).

По поводу устройства свайного основания Монферран дает комитету следующие пояснения, весьма существенные для понимания нами конструкции и технологии устройства фундаментов:

- «новые фундаменты устроены не под одними стенами, но сделаны ... сплошною массою по всему пространству предполагаемой пристройки»;
- «новые фундаменты опущены наравне с прежними основаниями церкви»;
- «по вырытии земли были биты трехсаженныя (6,4 м – здесь и далее курсивом примечания авторов статьи) елового дерева сваи, от 6-ти до 7-ми вершков (26...30 см) в отрубе, так что промежутки между ними были равны их толщине» (во всех прочих документах указано, что для свай использовалась сосна);
- «сии сваи, имеющие сверху железные кольца, были вколачиваемы бабою в 90 пудов (1,4 т) весом»;
- «по набитии свай земля между ними так отвердела, что нельзя было оную выковыривать железным ломом»;
- «для подрубки сих свай по ватерпасу оставлена была на время вода ... когда она поднялась до желаемой им вышины, тогда он по сему уровню приказал срубить сваи»;
- «после сего около свай очищена была земля до 8-ми вершков (35 см) глубины и сии пустые места были накрепко набиты щебнем»;
- «таким образом площадь, составляющая новое основание, была покрыта двенадцатью тысячами ста тридцатью сваями»;
- «крыльца были основаны на всю вышину на убог, дабы служить контрфорсами ... целой массе новых пристроек», поскольку «сии крыльца находились на копанной земле, следственно осадка оных отделила бы их от других пристроек»;
- «все пустые места в портиках, на коих не предполагалось никакого груза, были выведены отборною плитою с подбивкой рядами, а не просто забучены».

Опасность развития существенной неравномерности осадок между старыми и новыми конструкциями не было единственным недостатком проектного решения. Существенные проблемы имел и купол, который не опирался непосредственно на подкупольные пилоны.

По результатам рассмотрения проекта было решено доложить императору, что «члены сего комитета почитают нужным до исправления недостатков в проекте ... все строительные работы Исаакиевского собора остановить».

Третий этап истории строительства начался после полной переделки Монферраном проекта по замечаниям комитета.

Были предназначены к разборке два старых ринальдиевских западных пилон. Четыре новых пилон Монферран расставил так, чтобы подкупольный барабан опирался на пилоны.

К 1825 г. фундаменты по старому проекту были почти полностью закончены. Фундаменты под пилоны ринальдиевской церкви были оставлены без изменений, а построенные впоследствии разобраны до нижних рядов гранитной кладки. Фундаменты под восточные подкупольные пилоны были усилены приделкой к ним новых частей кладки. Под четыре колокольни и два портика (южный и северный), а впоследствии восточный и западный, были устроены добавочные фундаменты, основанные также на сваях.

Все сваи забивались, как тогда было принято, «частоколом», когда расстояние между ними было равно их диаметру. После срубки голов свай по ватерпасу предписывалось пространство между сваями «защебенить сплошь с утрамбовкой и залить жидким раствором». Фундаменты по сваям представляли собой сплошную кладку из гранита и плиты известняка. В местах наибольших нагрузок (пилоны, углы здания) применялась кладка из гранита, под стенами и рядами колонн – чередование известняковой кладки с рядами гранита. Кладка на известковом растворе образовывала массивный бутовый фундамент толщиной 7,5 м с расположением подошвы на абсолютной отметке около «- 2,6» м. Устройство всех фундаментов завершилось в 1827 г.

Принятые к 1825 г. в отношении плана и фундаментов собора решения уже не менялись (Рис. 2).

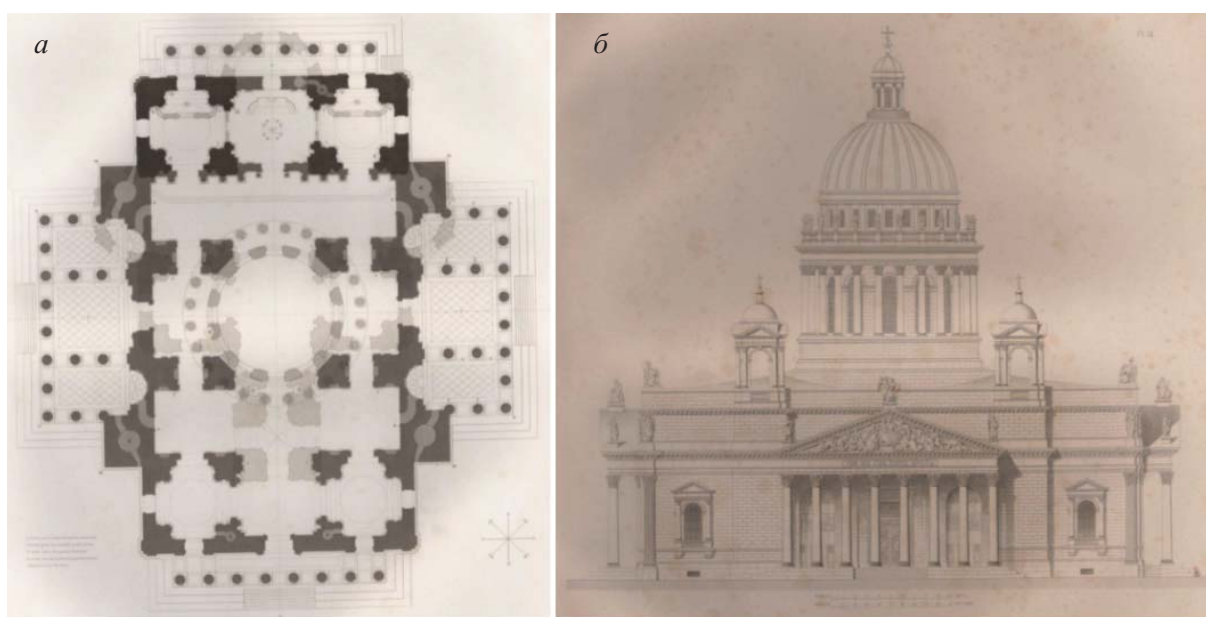


Рис. 2. О. Монферран. Проект Исаакиевского собора: а - план 1825 г.; б - фасад, вариант 1835 г. [5].

2. Об инженерных изысканиях начала XIX в. и инженерно-геологических условиях территории

Модюи упрекал Монферрана в том, что он не знал даже, «как глубоко надобно будет вести фундаменты; что он предполагал сделать их сплошь из обыкновенной бутовой плиты, употребляемой в частных домах; что он нигде не велел испытать зондом (зондом) глубину фундаментов, с которыми он должен был верстать новые,,,».

Здесь уместно упомянуть о методах исследования грунтов начала XIX в.

В своей книге «Исаакиевский собор», изданной в 1845 г. [5], Монферран ссылается на труд архитектора И.М. Лема, изданный в 1803 г. в Санкт-Петербурге [2]. В нем приводится следующее

описание изысканий того времени: «Надлежит сделать прежде испытание земли в тех местах, где работу производить и сваи бить надобно: для сего употребляется щуп, называемый «трепан», состоящий в железном пруте, у которого нижний конец сделан наподобие ложки, или спирали, наполняющейся просверленной землей».

«По мере того, как он низпускается, такову и длину его делают, притом с разными коленами, одно в другое вставленными, дабы составляли они собою один, который два человека наворачивают посредством рычага. Надлежит замечать, что когда забивается свая в песчаную землю, то поверхность ее претерпевает великое трение... в таких случаях по неупотреблению щупа можно будет ошибаться... в основании всегда надлежит испытать грунты земли сверлением, дабы увериться в ее твердости... **Должно остерегаться чтобы не ошибиться со взглядом в доброте почвы земной и наперед рассматривать довольно ли она крепка к держанию каменного сооружения** или надобно бить сваи и делать из дерева решетки: по набитии свай и по выемке земли распертой, срубать или насадить по уровню поперечные и продольные брусья, и набутить камнем».

Монферран возражал на замечание Модюи, «что употребленное им средство было лучше sondы, которая могла показать только свойства грунта земли», что он «велел вырыть у северного угла довольно широкий ров», откачал воду, осмотрел фундаменты и сделал в них проломы «для узнания степени твердости фундамента». Отсюда следует, что Монферран испытаний грунтов все же не проводил.

Первые инженерно-геологические изыскания, в современном понимании этого термина, были выполнены трестом Ленканализация в 1927-1939 годах (Рис. 3) [3]. Исследования свойств грунтов основания собора были выполнены в 1954 г. трестом ГРИИ в рамках исследований, проводимых ЛПИ. Согласно инженерно-геологическим изысканиям недавнего времени (2009 г.), инициированным Горным университетом, Исаакиевский собор располагается на склоне глубокой погребенной долины, понижающемся в северном направлении. В юго-западной части Исаакиевского собора кровля отложений венда находится на глубине 44,5 м. Как отмечает Р.Э.Дашко [1], изменение мощности четвертичной толщи в пределах контура собора на 20-25 м имеет принципиальное значение для оценки условий развития неравномерных деформаций собора. В разрезе четвертичных отложений прослеживаются межморенные, ледниковые, озерно-ледниковые и озерно-морские (литориновые) образования, перекрытые техногенными грунтами. В верхней части разреза отмечаются прослой торфа и заторфованных отложений. При изысканиях 2009 г. уровень грунтовых вод был зафиксирован на глубине 1,8...2,0 м от поверхности. Исследования, выполненные под руководством Р.Э.Дашко [1], показывают, что по сравнению с данными ЛПИ за последние полвека произошло существенное негативное изменение химического состава грунтовых вод за счет утечек из системы водоотведения, расположенной по контуру собора.

Литориновые супеси и озерно-ледниковые суглинки имеют текучую, реже текучепластичную консистенции, их естественная влажность изменяется от 34 до 51%. Песчаные литориновые разности в основании собора имеют выраженные пльвунные свойства за счет высокой микробной порожности. Водопроницаемость песков снижается до значений, характерных для глинистых разностей. Исследованные озерно-ледниковые и моренные глинистые грунты характеризуются как квазипластичные отложения [1].

3. Об оценке несущей способности свай

В своем письме Монферрану от 3 апреля 1818 г. Бетанкур указывал, что «нужно забить сваи от 6 до 7 вершков в диаметре (26,4 ... 30,8 см) до отказа, т.е. бить сваи бабами весом от 75 до 80 пудов (1,2 ... 1,3 т), поднятыми на высоту 11-12 футов (3,35 ... 3,65 м), до тех пор, пока, получив 10 ударов, они не опускаются ни на один дюйм», чем Монферран и руководствовался при строительстве.

Первую оценку нагрузки, приходящейся на сваю, дал в 1912 г. П.И.Дмитриев, профессор Института гражданских инженеров, выполнивший стаические расчеты элементов конструкции собора. По его подсчетам, на одну сваю приходилось в среднем 18 т. Н.У.Малеин в 1947 г., выполнил первую расчетную оценку несущей способности деревянной сваи длиной 6,4 м, определив ее равной примерно 18 т. По его оценке, при общем количестве свай под ринальдиевскую церковь и новый собор в 24 000 штук, и весе всего сооружения в 300 000 т, на каждую сваю приходится по 12,5 т. Ученые ЛПИ в 1954 г. пришли к выводу о том, что на каждую сваю приходится в среднем

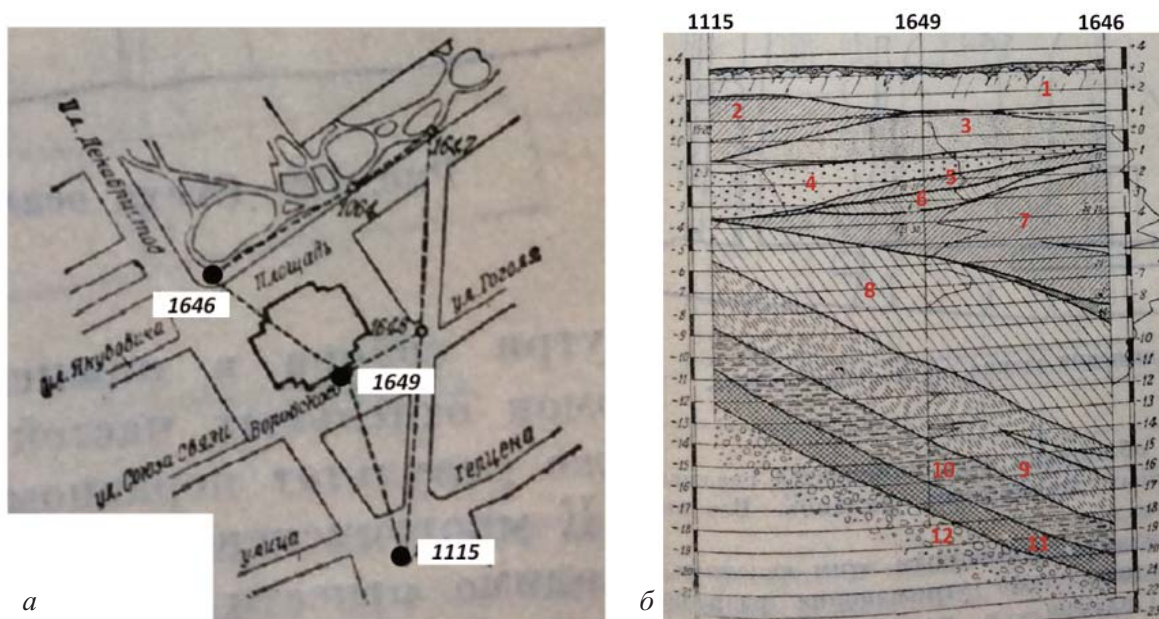


Рис. 3. Инженерно-геологический разрез по скважинам треста Ленканализация, выполненным в 1927-1939 годах (Н.П.Никитин, 1939):

а - план расположения скважин; б - разрез; цифрами обозначены слои грунта, сохранено авторское наименование слоев: 1 – насыпной грунт; 2 – тощий суглинок; 3 – мелкий песок; 4 – средний песок; 5 – тощий суглинок; 6 – мелкий глинистый песок; 7 – средний суглинок; 8 – жирный суглинок; 9 – слоистый жирный суглинок; 10 – ленточная глина; 11 – светлая глина; 12 – валунный суглинок.

15 т, а на сваи под пилонами купола – 22,5 т. При этом отмечалось, что при уровне грунтовых вод на отметке +1,0 м и расположении голов свай на отметке -2,6 м, над ними имеется более 3 м грунтовых вод, что защищает древесину от гниения.

Однако основываться в вопросе сохранности свай только на их гарантированном положении ниже уровня грунтовых вод представляется недостаточным. Следует принять во внимание результаты исследования Р.Э.Дашко [1], согласно которым была зафиксирована биопораженность фрагментов дерева (сосны), извлеченных из техногенного слоя при бурении скважины с глубины 2,5 м (было обнаружено восемь видов микромицетов - деструкторов различных материалов).

Оценка несущей способности свай интересовала многих исследователей. Однако представляется, что вопрос о несущей способности деревянных свай не является столь существенным, поскольку исторические сваи имели ограниченную (высотой свола дерева) длину и поэтому никак не могли в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга достичь надежных, малосжимаемых слоев грунта. Под остриями свай оставалась мощная толща слабых водонасыщенных глинистых отложений. Поэтому устройство свайного поля понималось как «уплотнение грунта сваями». Поверхностные песчаные отложения, служащие основанием рядовой петербургской застройки, неплохо справлялись с перераспределением давления от здания на слабые подстилающие грунты (играя роль природной песчаной подушки), если здание не было высоким (не выше карниза императорского Зимнего дворца – в чем, содержался не только этический аспект, но и эмпирически найденное геотехническое условие безопасности постройки). Сваи забивались при строительстве особо ответственных, высоких и тяжелых зданий. Забивка способствовала уплотнению грунта между сваями и выполняла роль вертикального армирования естественной песчаной подушки, повышая ее жесткость и тем самым в некоторой степени способствуя снижению неравномерности осадок. Разумеется, это никак не исключало развития существенных осадок слабого основания свайного фундамента.

Имеющиеся исследования инженерно-геологических условий памятника позволяют с помощью современных инженерных методов расчета оценить величину осадки собора, которая составляет примерно 1,0 м. Таким образом, свайное поле, в основании которого залегает толща слабых водонасыщенных глинистых грунтов, не в состоянии было обеспечить безопасные осадки сооружения. Как известно, чем больше абсолютные осадки, тем выше и их неравномерность.

В то же время, как показывают расчеты ЛПИ, выполненные в 1954 г., устройство свайного основания с ростверком в виде массивной бутовой плиты обеспечило необходимую устойчивость основания столь тяжелого сооружения.

4. О развитии деформаций в процессе строительства

В 1827 г. были сложены стилобаты портиков, к осени 1830 г. с четырех сторон контура будущих стен собора на своих стилобатах, еще не облицованных гранитом, стояли четыре портика. С восточной стороны, позади восточного портика, возвышались старые алтарные части ринальдиевского собора.

Конечно же, возведение более легких портиков до устройства основного, гораздо более тяжелого объема здания привело к развитию существенных неравномерных осадок. Многие исследователи ставили такую последовательность работ в вину Монферрану, хотя и признавали, что так действовать приходилось для установки грандиозных монолитов гранитных колонн, что требовало достаточного пространства.

Кладка стен, внутренних столбов и пилонов началась одновременно и велась по всему периметру здания, из кирпича с гранитными прослойками в нижней части здания и из песчаника в верхней. Стены возводились толщиной около 2,5 м.

В течение 1836-1837 г. были полностью закончены антаблемент вокруг всего здания и большая часть аттика. Внутри здания закончены были пилоны и сведены подкупольные арки с парусами. К 1842 г. здание собора было вчерне закончено. Оставались небольшие доделки и устройство интерьеров. Открытие собора произошло 30 мая 1858 г.

Претерпев осадку, основной объем здания потянул за собой фронтоны. Смещение колонны от вертикали привело к возрастанию местных напряжений, угрожавших образованием трещин. Для исключения местного смятия в опорной части колонн Монферран в 1841 г. распорядился загнать медные клинья в образовавшуюся щель между нижней постелью колонны и верхним основанием гранитной опоры.

Однако деформации продолжались и в 1873 г., когда стали лопаться перекосившиеся архитравы, под портики Исаакиевского собора были установлены леса, рассчитанные на восприятие веса антаблемента с фронтоном. Верхние части разгруженных колонн были освобождены от бронзовых капителей и срублены выше астрагала (в архитектурном ордере астрагал находится между стволом колонны и капителью). Эти работы растянулись на целых четверть века (до 1895 г.).

К 1927 г., по собственному наблюдению Н.П.Никитина, после снятия бронзовых обрамлений баз колонн, в их нижней части, а также в гранитной подставке, обнаружались существенные разрушения. Особенно они были видны на колонне №47, входящей своей четвертью сечения в тело кладки юго-западной колокольни (Рис. 4).

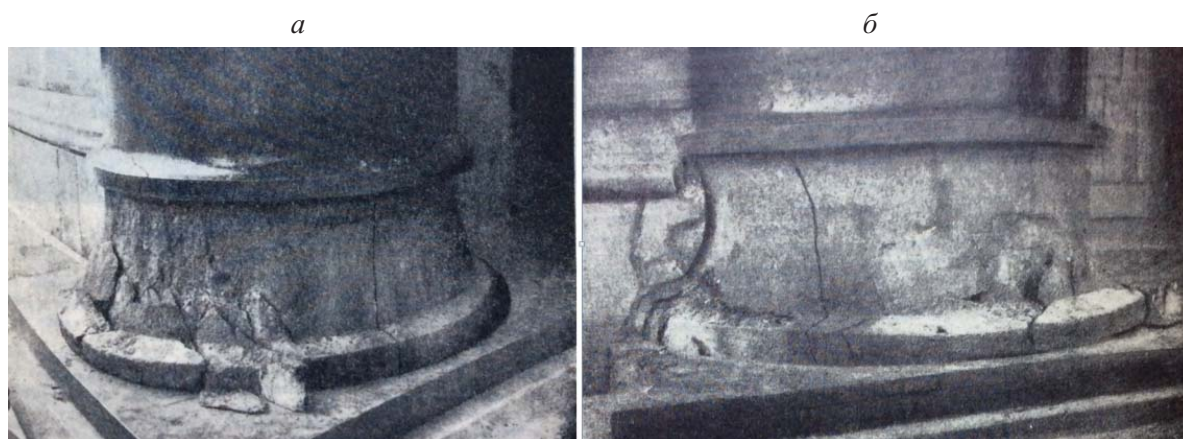


Рис. 4. Трещины в колонне №47 и ее гранитной базе [3].

Геодезические измерения, выполненные Н.П.Никитиным, заложили основу всей системы последующих наблюдений. Н.П.Никитин установил, что к 1927 г. осадочное движение здания было направлено с востока на запад и с севера на юг. Разница осадок самой высокой точки (у окна под се-

веро-восточным приделом) и самой низкой (у окна юго-западного угла, выходящего на Исаакиевскую пл.), расположенных почти по диагонали здания (90 м), составляла 0,472 м. При этом яблоко креста центрального купола сместилось на 270 мм в западную сторону.

Наибольшие отклонения поверху (в направлении от собора) получили колонны северного и южного портиков, заделанные в углы колоколен: на северном портике колонна №45 - 120 мм, №46 - 97 мм; на южном - колонна №47 - 153 мм, №48 - 145 мм (расположение колонн - см. Рис. 5). Расколотая гранитная подставка под каждой колонной была усилена тремя железными хомутами. Со временем подобному протезированию пришлось подвергнуть и другие колонны портиков.

Геодезические измерения, организованные Н.П.Никитиным в 1927 г. и проводимые с тех пор с определенной периодичностью трестом ГРИИ до настоящего времени, позволяют оценить дальнейшее развитие осадок. Измерения приращений осадок пилонов, определенных по геодезическим маркам в период с 1927 по 2008 г., позволили отметить, что осадки пилонов на протяжении последних 80 лет происходит равномерно, с одинаковой скоростью, равной 0,3 мм/год. Стены собора за этот же промежуток времени также получили равномерные осадки. Об этом свидетельствуют эпюры, построенные по абсолютным отметкам импостов галерей в стилобатной части собора и импостам колонн четырех колоколен (Рис. 5). Эпюры накопленных неравномерных осадок, построенные по измерениям ГРИИ 1961 г. практически не изменились с 1927 г. Таким образом, стабилизировались не осадки, а накопление неравномерности осадок основного объема сооружения.

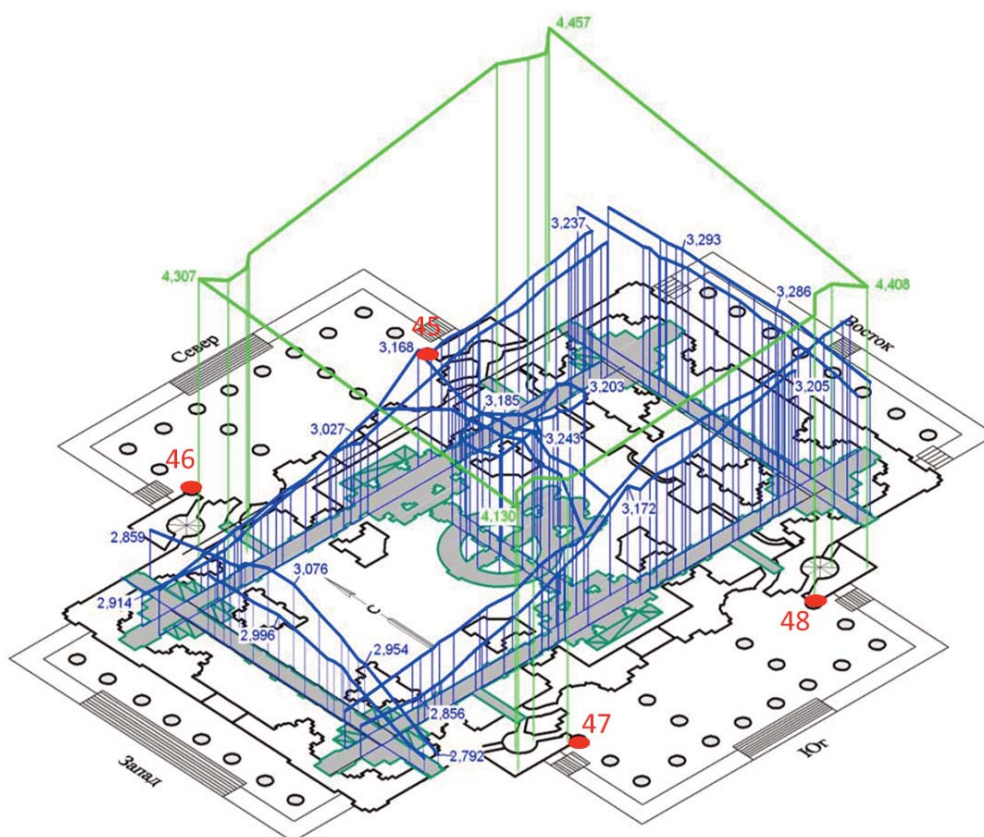


Рис. 5. Профили, построенные по абсолютным отметкам (м) импостов галерей в стилобатной части собора (синий цвет) и импостам колонн четырех колоколен (зеленый цвет); красным цветом указаны номера колонн, примыкающих к колокольням (измерения ГРИИ, 1961 г.).

Наблюдаемая сегодня неравномерность осадок сформировалась, вероятнее всего, еще в процессе строительства здания. Именно поэтому при перепаде отметок на полметра по диагонали собора (в направлении с северо-востока к юго-западу) мы не наблюдаем соответствующего значительного раскрытия трещин в кладке. В процессе строительства собора происходило неравномерное нагружение основания: в алтарной части здания сохранялись ринальдиевские пилоны, половина пятна застройки уже испытывала нагрузку и строительство собора по проекту Монферрана являлось повторным ее приложением. Очевидно, вследствие этого обстоятельства восточная часть собора претерпела наименьшие осадки, а западная - наибольшие, характеризующиеся за пределами старого

свайного поля треугольной эпюрой осадок (по оси восток-запад). Весьма знаменательно, что общее падение кровли отложений венда, ориентированное в направлении с юга на север, не изменило характер оседания. Это свидетельствует о том очевидном обстоятельстве, что преимущественное развитие деформаций грунта происходит непосредственно под подошвой свайного поля (естественной песчаной подушки, уплотненной короткими деревянными сваями).

Достаточно высокая пространственная жесткость, которую приобрело здание после возведения его основного объема, не позволила далее увеличиваться неравномерности осадок. В то же время для портиков, оказавшихся в зоне влияния основного объема здания и не имеющих сопоставимой с ним пространственной жесткости, неравномерность осадок со временем продолжала нарастать. Если принять за ноль положение наружной продольной стены собора в зоне репера «Главнаука 1», установленного, то за прошедшие 56 лет осадки портиков отстали от нее на 10 ... 15 мм (наибольшее отставание заметно для северного портика) (Рис. 6).

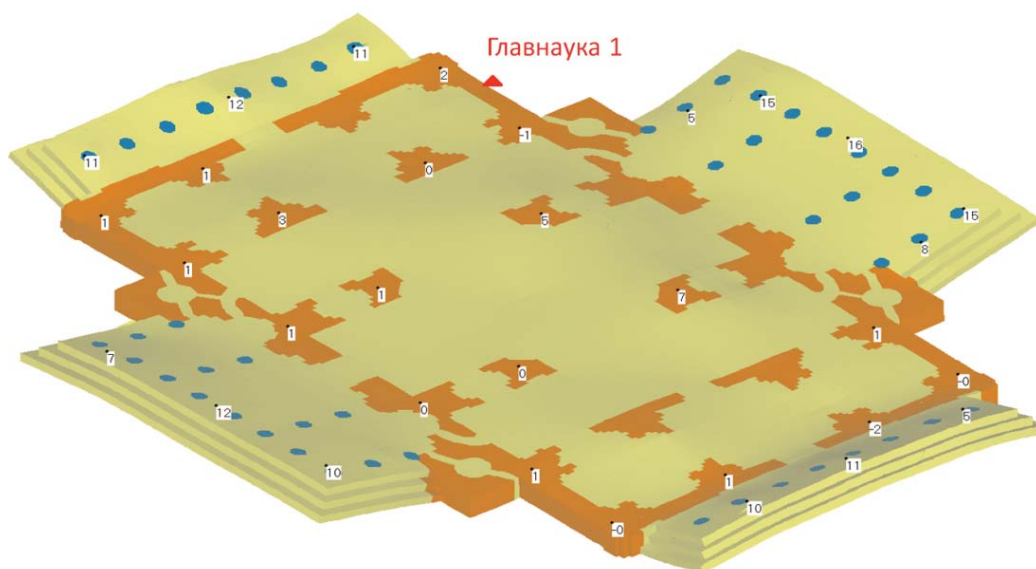


Рис. 6. Деформированная схема конструкций стилобатной части Исаакиевского собора на стадии ползучести за период 1952-2008 г.

Подписано отставание деформации в точке (мм) от осадок наружной продольной стены собора в зоне репера Главнаука 1.

5. Вместо заключения: о необходимости моделирования пространственной работы конструкции сооружения

В статье, посвященной истории создания Исаакиевского собора, опубликованной С.Ильиным в журнале «Новое Время» за 1916 год, было приведено интервью с профессором П.И.Дмитриевым, выполнившим в 1912 г. прикидочные расчеты конструкций собора: «Без расчетного исследования устойчивости и прочности собора, - говорил проф. П. И. Дмитриев, — нельзя судить вполне о состоянии собора, учесть влияние в будущем всевозможных факторов жизни на равновесное состояние масс собора и наметить рациональные приемы для полного исправления и приведения собора в надлежащий вид. Все будет гадательно и придется идти ощупью. Но подобная гадательность недопустима для такого монументального памятника, каким является Исаакиевский собор».

Возможность расчетов такой сложной структуры как Исаакиевский собор появилась уже в наше время, благодаря развитию вычислительной техники и расчетных программ, реализующих современные численные методы.

Примером такого моделирования является расчет, выполненный для Никольского Морского собора в г. Кронштадте, построенного в 1902-1913 г. Для определения основных причин возникновения дефектов в его конструкции специалистами института «Геореконструкция» было выполнено численное моделирование работы системы «основание-фундаменты-надземные конструкции», позволившее дать убедительную диагностику причин развития деформаций, выявить опасные участки конструкций и предложить минимальный (при этом необходимый и достаточный) перечень необходимых работ по обеспечению механической безопасности памятника [4].

К сожалению, для Исаакиевского собора подобные расчеты до сих пор не выполнены, хотя это сооружение, как никакое другое, особенно остро в них нуждается.

Литература

1. Дашко Р.Э., Шидловская А.В., Александрова О.Ю., Алексеев И.В. Инженерно-геологические и гидрогеологические проблемы обоснования длительной устойчивости Исаакиевского собора (Санкт-Петербург) // Записки Горного института. Т.195. С. 28-31.
2. Лем И.М. Начертание с практическим наставлением, как строить разные здания, с принадлежащими правилами украшения и расположения, как то: церквей, увеселительных домов, сельских жилищ служащих для всегдашнего или временного пребывания служеб, мельниц, шлюзов, плотин, деревянных и каменных разных заведений / соч. во граде Святого Петра архитектором бго класса и кавалером Лемом. В 2 ч. Ч. 1-2. СПб.: При 1-м Кадетском корпусе иждивением И. Глазунова, 1803. Ч. 1: 2, 10 с., 10 л. грав. Ч. 2: 18 с., 11 л. Грав.
3. Никитин Н.П. Огюст Монферран. Проектирование и строительство Исаакиевского собора и Александровской колонны. Издание Ленингр.отд. союза советских архитекторов. Л., 1939. 348 с.
4. Шашкин А.Г, Шашкин К.Г., Богов С.Г., Шашкин В.А., Шашкин М.А. Мониторинг зданий и сооружений при строительстве и эксплуатации. Изд-во института «Геореконструкция», СПб, 2021. 640 с.
5. Montferrand A. R. Eglise cathédrale de Saint Isaac. Description architecturale, pittoresque et historique de ce monument — Saint-Petersbourg, 1845. 137 p.

3. ИЗУЧЕНИЕ МАССИВОВ ГРУНТОВ В ЦЕЛЯХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

ОЦЕНКА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД КАК КОНСТРУКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ГОРНОГО СООРУЖЕНИЯ

И.В. Абатурова, И.А. Королева, Л.А. Стороженко, И.А. Савинцев

Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.
E-mail: irina.eka@mail.ru

Исторически сложилось так, что Россия обладает значительными запасами полезных ископаемых, благодаря этому страна занимает ведущие позиции на мировом рынке. Однако ухудшение минерально-сырьевой базы на хорошо освоенных территориях потребовало освоения месторождений на востоке страны, что повлекло за собой усложнение геологических, инженерно-геологических условий и связанных с ними условий вскрытия. Так же важным является факт увеличения глубин карьеров до величин 700–800 м, что еще более усугубляет ситуацию. Очевидно, что актуальной задачей при оценке месторождений полезных ископаемых, как объекта, является обеспечение его корректными данными о массиве горных пород и его компонентах, определяющих как точность расчетов оптимальных параметров откосов бортов и уступов, так и экономику будущего предприятия. Недостаточная изученность компонентов массива горных пород или их недоучет проектными организациями может привести к деформациям отдельных участков бортов карьера из-за несоответствия фактических данных и принятых параметров откосов. Измененный объем вскрыши на который предприятие затрачивает огромные средства из-за заниженного угла откоса приведен на Рис. 1 [2].

Таким образом, оценка массива горных пород и компонентов, его характеризующих месторождения требует точного и пристального подхода.

Теоретические предпосылки работ

Вслед за П.Н. Панюковым (1962), Л. Мюллером (1971), И.С. Комаровым и другими предлагаем понимать под «массивом горных пород любую ограниченную в пространстве (по площади и глубине) часть земной коры, соизмеримую с отдельным сооружением или комплексом сооружений, со всеми особенностями ее строения и нарушениями сплошности (разломами, трещинами), содержащимися в ней подземными водами, газами и сформировавшимися в ее пределах физическими полями» [4, 6, 8].

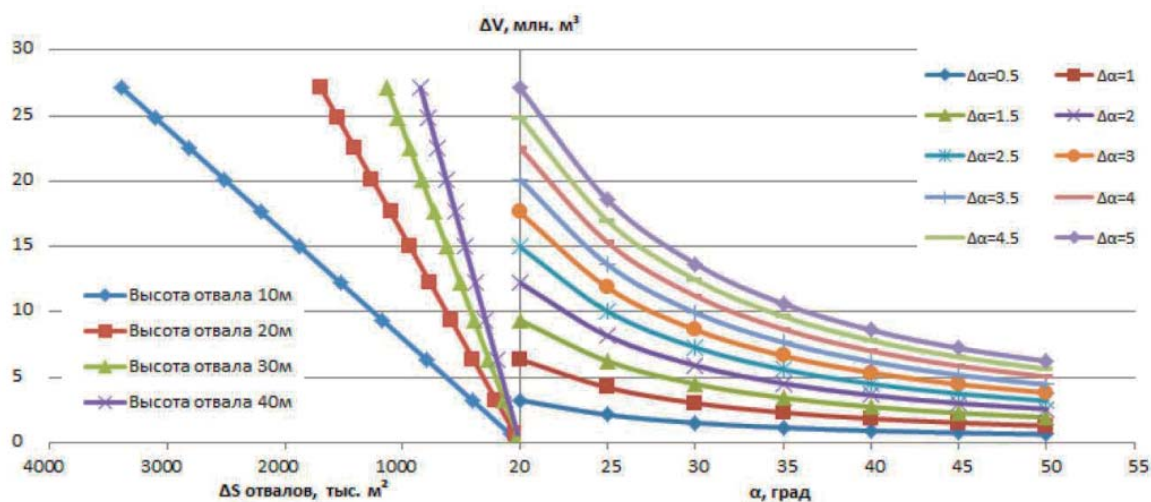


Рис. 1. Номограмма зависимости между изменением объема вскрыши ΔV для различных α и $\Delta\alpha$, а также подоотвальных площадей (ΔS отвалов) при различной высоте отвала. Высота борта $H=300$ м.

Оценочными критериями при изучении массива горных пород месторождений полезных ископаемых являются [1, 7]:

- геолого-структурные условия (условия залегания пород, тектоническая нарушенность, степень трещиноватости);
- литолого-петрографические условия пород (генезис, возраст, свойства пород);
- мерзлотно-гидрогеологические условия (типы, характер подземных вод, мерзлое состояние, температура пород);
- экзодинамические условия (естественное напряженное состояние, геологические и горно-геологические процессы).

Для массивов горных пород, сложенных скальными грунтами одним из главных параметров влияющих на развитие инженерно-геологических процессов, является тектоническая нарушенность и связанная с ней степень трещиноватости. Они во многом определяют дискретность, неоднородность, анизотропность, широкий диапазон изменения физико-механических свойств даже в пределах незначительного по объему массива грунта. Современный тектонофизический подход определяет тектонические нарушения как «объемное геологическое тело, характеризующееся определенной внутренней структурой, развитие которой происходит в несколько стадий». Исследованиями установлено, что происходящие в литосфере изменения геодинамических обстановок приводят к тому, что формирование внутренней структуры разломов может прерваться на любой стадии, потом временно прекратиться либо возобновиться, но уже с другими кинематическими характеристиками [9].

Процессы, происходящие в тектонических зонах на разных этапах развития, могут привести либо к улучшению состояния массива, либо к ухудшению [2]. Таким образом, для тектонических зон практически любых месторождений характерны следующие особенности:

- этапность развития с проявлениями гидротермальными метасоматическими или метаморфическими;
- линейность, обусловленная значительной протяженностью;
- внутренняя структура характеризует породы различной степени преобразования от брекчий до щебня и глин;
- зональность – от раздробленных пород до сильнотрещиноватых.

Для решения задач по инженерно-геологической оценке *геолого-структурного строения* месторождений на разведочных стадиях необходимо использование прямых методов: полевых и камеральных. Первые представлены инженерно-геологической документацией ориентированного и не ориентированного керна, вторые нацелены на оценку качественных и количественных параметров трещиноватости.

Литолого-петрографические условия определяют расчленение массива горных пород на структурные элементы разного уровня. При оценке массива горных пород первостепенное значение имеет анализ вмещающих пород, так как они будут являться конструктивными элементами карьера. Особое внимание должно уделяться минеральному составу, структурно-текстурным особенностям, вторичным постдиагенетическим изменениям, физико-механическим свойствам. Проявление на месторождениях различных типов метасоматоза, метаморфизма, выветривания приводят к изменению физико-механических свойств.

Мерзлотно-гидрогеологические условия являются важным элементом инженерно-геологических условий, т.е. наличие подземных вод влияет на изменение физико-механических свойств при дренаже или активизацию инженерно-геологических процессов и фильтрационных деформаций при их прорывах.

Наличие многолетнемерзлых пород осложняет ведение горных работ особенно на месторождениях с прерывистым или островным распространением мерзлоты. Отработка месторождений в свою очередь приводит к деградации мерзлоты, изменению мерзлотно-гидрогеологических условий. При оценке мерзлотно-гидрогеологических условий важно изучить состояние пород (мерзлое, талое), условия их распространения в плане и разрезе, установить температуру горных пород, мощность ММП, температурный градиент, физико-механические свойства пород. По результатам полевых и лабораторных работ строятся графики изменения температур, графики хода температурного промерзания пород, карта геокриологических условий, устанавливается льдистость пород, наличие или отсутствие повторно-жильных льдов, погребенных льдов и т.д.

Геологические и горно-геологические процессы. При оценке работы карьера важным моментом является изучение современных геологических процессов, которые могут привести к нарушению устойчивости бортов карьеров. К таким процессам относятся: выветривание пород, с формированием зональных кор выветривания; степень и характер закарстованности пород; криогенные процессы (морозобойное растрескивание, наледи, термокарст) и др.

При изучении необходимо фиксировать их наличие, размеры, количество и т.д. Данные должны заноситься в каталоги баз данных, затем строится карта развития экзогенных геологических процессов, и выполняется прогноз их влияния на устойчивость карьера.

Практические результаты

Оценку массива горных пород как конструктивного элемента карьера предлагаем рассмотреть на примере месторождения Тарын, которое расположено в пределах Оймяконского улуса республики Саха (Якутия).

В структурно-тектоническом отношении месторождение приурочено к мезозойской Верхояно-Колымской складчатой системе, в зоне сочленения Аян-Юрхского антиклинория и Адыча-Тарынской антиклинальной зоны. Широким распространением здесь пользуется как пликативная, так и дизъюнктивная тектоника.

В геологическом строении принимают участие четвертичные отложения неоднородные по возрасту, составу, мощности, генезису (аллювиальные, элювиальные, делювиально-солифлюкционные и др.), включающие мощные линзы прослой и пласты льда. Такой комплекс получил название «ледовый комплекс» [3].

Подстилаются четвертичные отложения скальными грунтами, представленными алевролитами средненорийскими верхнего триаса темно-серого цвета, массивными, мелкозернистыми, слабыветрелыми, малопрочными, средней прочности и прочными, морозными.

Таким образом, массив горных пород месторождения имеет 2-х ярусное строение. Верхний этаж – «ледовый комплекс» сложен:

- суглинками делювиально-солифлюкционного генезиса твердомерзлыми, слабольдистыми и льдистыми со слоистыми, сетчатыми, линзовидными и жильными криогенными текстурами (Рис. 2, 3);
- супесью аллювиальной твердомерзлой, слабольдистой, с массивными и слоистыми криогенными текстурами;
- галечниковыми аллювиальными и щебенистыми элювиальными грунтами с супесчаным заполнителем слабольдистым с массивными и корковыми криогенными текстурами;
- льдом мощностью до 5 м (Рис. 4).



Рис. 2. Слоистая криогенная текстура.

Нижний структурный этаж представлен алевролитами окварцованными мелкозернистыми, массивной текстуры, морозными, прочными и средней прочности, неразмягчаемыми. Малопрочные грунты – это метасоматически измененные до хлорит-серицитовых метасоматитов породы, характеризующиеся как размягчаемые.



Рис. 3. Жильная криогенная текстура.



Рис. 4. Лед (скважина С-20 г).

С целью оценки степени и характера трещиноватости использовались: показатель качества грунта (RQD), модуль трещиноватости ($M_{тр}$), линейный размер элементарного структурного блока (l), коэффициент зон ослабления.

Поверхности трещин, вскрытые на месторождении, характеризуются как волнистые пригладенные (14,1 %), волнистые шероховатые (19,4 %), плоские шероховатые (38,5 %) и плоские пригладенные (28,0 %). Две последние поверхности характерны для зон расланцевания (Рис. 5). Среди минерального типа заполнителя трещин преобладает кварц-карбонатный материал (24 %) и трещины без заполнителя (36 %) (Рис. 6).

По отношению к оси керна выделяются 3 системы трещин под углами 0-30°, 30-60° и 60-90°, преобладает система 60-90° к оси керна (76,1 %) (Рис. 7).

Особенности строения массива горных пород месторождения Тарын имеют выраженные черты анизотропии и неоднородности, обусловленные степенью трещиноватости, раздробленности, расланцевания грунтов, наличием неблагоприятно ориентированных зон и поверхностей ослабления, морфологией стенок трещин, минеральным составом заполнителя (Рис. 8). Именно эти особенности определяют поведение грунтов в пределах активной зоны карьера.

Структурно-тектоническое строение карьера характеризуется как мозаичное, при котором структурно-однородные области разделяются зонами смятия или участками повышенной трещиноватости

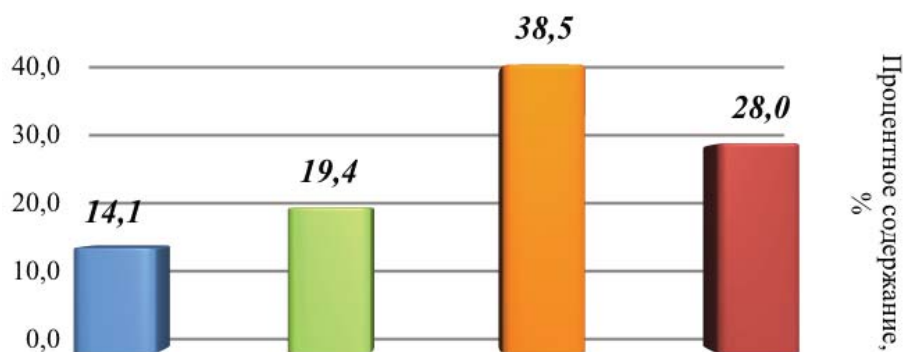
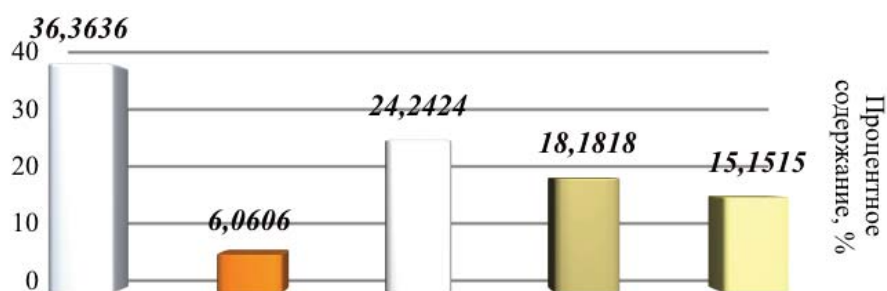


Рис. 5. График характера поверхностей открытых трещин.



Примечание: NON-без наполнителя, FE-ожелезнение, Q-CA-квар-карбонат, CY-глинка трения, PI-пирит

Рис. 6. График минеральных типов наполнителей открытых трещин.

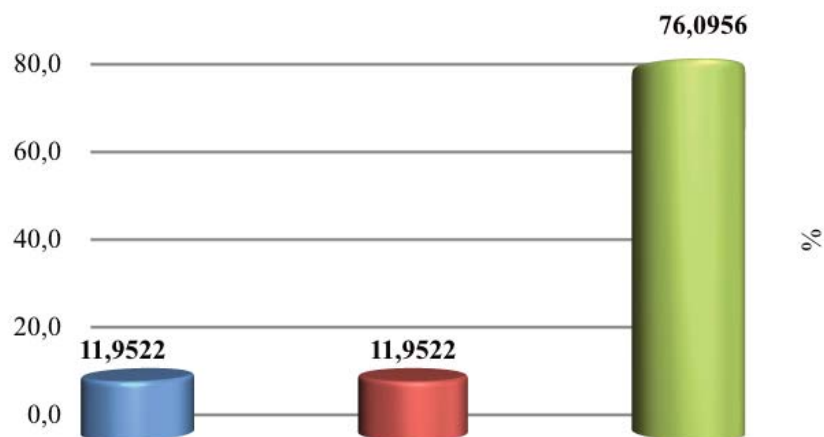


Рис. 7. Гистограмма ориентации преобладающих углов трещин по отношению к оси керна.

и раздробленности. Очевидно, что сложность и одновременность действия процессов формирования массива привели к формированию различных генетических типов трещин, таких как:

- сингенетические – литогенетические (напластования);
- постгенетические – тектонические, прямолинейные, скальвания с зеркалами и штрихами скольжения;
- наложенные – выветривания, встречаются в верхней части массива грунтов.

В массиве выделяются открытые и закрытые трещины. Открытые трещины – сколовые, поверхности их шероховатые, приглаженные, редко бугристые, с зеркалами и штрихами скольжения, покрытые глиной трения, либо кварц-карбонатным материалом. По углу наклона к оси керна выделяются трещины крутые (0-30°) и пологие 60-90°. Закрытые трещины занимают секущее положение (лестничное) по отношению к напластованию грунтов. Анализ степени трещинова-



- зона ослабления
 – хрупко-пластическая зона

Рис. 8. Зона ослабления и хрупко-пластическая зона.

тости показал, что зоны ослабления развиты до глубины отработки карьера, и имеют мощности от 0,1 до 10 м.

Вся совокупность исследований позволила установить, что основными категориями грунтов на месторождении являются среднетрещиноватые породы (64 %), раздробленные и сильнотрещиноватые составляют 26 %.

Мерзлотно-гидрогеологические условия. Месторождение приурочено к Верхояно-Чукотской складчатой системе. ММП имеют сплошное распространение по площади и непрерывное по вертикали, состоящее из маломощного яруса синкриогенных склоновых накоплений и эпикриогенных коренных пород. Мощность ММП изменяется от 300 до 600 м, температура грунтов на глубине 15–20 м изменяется от минус 4,5 до минус 8°C.

Выполненная оценка основных компонентов массива горных пород позволила построить инженерно-геологическую модель месторождения, в которой отражены сходство и различие отдельных участков по условиям устойчивости пород в откосах уступов и бортов карьера. А также определить для каждого выделенного участка на основе установленных инженерно-геологических особенностей оптимальный угол наклона борта и уступа карьера, обеспечивающий его устойчивость.

Литература

1. Абатурова И.В., Савинцев И.А., Стороженко Л.А. Использование геолого-структурного анализа при оценке инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых. *Инженерная и рудная геофизика 2020. 16-я научно-практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020».* Пермь, 12–16 мая 2020 г.
2. Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Немчинова А.В. Влияние степени изученности геомеханического состояния массива на эффективность разработки месторождений // *Актуальные проблемы горного дела.* 2016. №2. С. 14-21.
3. Калабин А.И. *Вечная мерзлота и гидрогеология Северо-востока СССР.* Магадан, 1960.
4. Комаров И.С. *Накопление и обработка информации при инженерно-геологических исследованиях.* – М.: Недра, 1972. – 295 с.
5. Коновалов А.А. *Оценочные методы анализа строения и динамики криолитозоны.* Криосфера Земли, 1997, т. 1, №3, с. 73–78.
6. Мюллер Л. *Инженерная геология. Механика скальных массивов.* – М.: Мир, 1971. – 254 с.
7. *Оценка и прогноз инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых горно-складчатых областей.* Научное издание / И.В. Абатурова. ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет». Екатеринбург: типография «Уральский центр академического обслуживания», 2011.
8. Панюков П.Н. *Инженерная геология.* – М.: Недра, 1978. – 295 с.
9. Серый С.С. *Инженерно-геологическая оценка и моделирование структуры скальных массивов горных пород рудных месторождений.* Дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 1998. 132 с.

РОЛЬ ПЕСЧАНЫХ ТОЛЩ В РАЗВИТИИ ДЕФОРМАЦИЙ НА СКЛОНЕ ВОРОБЬЕВЫХ ГОР В МОСКВЕ

О.С. Барыкина, О.В. Зеркаль, Т.В. Андреева, И.П. Гвоздева

Геологический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991,
Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: barykina@geol.msu.ru

Введение. Многие участки правого берега р. Москвы в границах мегаполиса подвержены оползневым деформациям. Одним из крупнейших оползневых массивов считается склон Воробьевых гор, протягивающийся вдоль реки на расстоянии почти 4000 м. Вопрос возраста и механизма оползневых деформаций вызывает споры и по сей день. Но большинство исследователей [1-3, 5-7, 9] сходятся во мнении, что на этом участке одновременно действует нескольких механизмов деформирования грунтов, значительно отличаясь в различных частях склона. Так, основное внимание, начиная с Б.М. Даньшина (1937), уделяется точке зрения, что смещенные породы опускаются ниже современного базиса эрозии - дна р. Москвы [2]. Соответственно, оползневые процессы на рассматриваемом участке являются глубокими, что говорит о древнем возрасте оползневых деформаций. Такой процесс развивается по механизму сдвига крупных блоков, слагаемых мезозой-кайнозойскими отложениями, что подтверждается наличием серии плоскостей скольжения, выявленных в толще юрских глин [1, 3, 9]. Мощность таких оползневых блоков на рассматриваемой территории, по данным буровых работ [1, 3, 9], достигает 80-100 м. Другим типом оползней, развитых на рассматриваемом склоне, отличающихся от первого и механизмом, и возрастом, и глубиной захвата, можно считать относительно неглубокие оползни, захватывающие только четвертичные, меловые и верхнеюрские песчаные отложения. И в первом, и во втором случае большую часть смещенных блоков слагают преимущественно песчаные отложения мезозой-кайнозойского возраста. Выявлению их роли в развитии склоновых деформаций и посвящена эта работа.

Характеристика инженерно-геологических условий. В геоморфологическом плане Воробьевы горы представляют собой оползневой склон правого борта долины р. Москвы, протянувшийся от устья р. Сетунь до Нескучного сада. Воробьевы горы — это склон Теплостанской возвышенности возвышающийся над урезом реки на 78 м, с перепадом высот около 30 м. В настоящее время этот участок города представляет собой лесной массив, вытянутый с севера на юг на 4 км, шириной от 400 до 100 м.

Поверхность склона Воробьевых гор имеет грядово-холмистый характер с многочисленными эрозионными формами – оврагами и балками, активным развитием оползневых процессов и многочисленными выходами грунтовых вод на протяжении всего склона – как в виде отдельных родников, так и целых заболоченных участков в нижней части оползневого склона в зоне разгрузки подземных вод. Поверхность склона, перепад высот которого достигает 60-70 м, имеет явно выраженный оползневой рельеф – крутой откос в верхней части склона и располагающиеся ниже в несколько ярусов оползневые ступени с характерным бугристо-западинным рельефом. Нижняя часть склона, примыкающая к набережной Москвы-реки, существенно техногенно изменена при выполнении противооползневых мероприятий.

В строении водораздельной части Воробьевых гор последовательно снизу-вверх принимают участие породы среднего карбона, батского-титонского ярусов юры, берриасского-аптского ярусов нижнего мела, и четвертичные образования, представленные моренными и водно-ледниковыми накоплениями. Как уже было отмечено, большинство исследователей [1-7, 9], изучавших оползни Воробьевых гор, рассматривают глинистые отложения юрского возраста в качестве основного деформирующегося горизонта оползневых массивов. В связи с этим, верхнюю часть разреза, перекрывающую эти образования, формируют три толщи, в составе которых преобладают пески: песчано-глинистые верхнеюрские отложения титонского яруса (рис. 1а), нижнемеловые преимущественно песчаные отложения (рис. 1б) и четвертичные гляциальные, флювиогляциальные образования (рис. 1в). В пределах склона все они находятся в оползневом залегании.



Рис. 1. Преимущественно песчаные отложения разреза Воробьевых гор:

а – верхнеюрские отложения титонского яруса, б – нижнемеловые отложения готеривского, барремского и аптского ярусов, в – четвертичные флювиогляциальные отложения.

Отложения титонского яруса залегают несогласно на глинистых отложениях киммериджа, оксфорда и келловея, и представлены *лопатинской свитой* – серовато-зелеными и бурыми мелкими глинистыми песками и *кунцевской свитой* – песками зеленовато-серыми, мелкими, сильнослюдистыми, местами глинистыми с прослоями супеси зеленовато-серой, пластичной, общей мощностью до 10 м.

Отложения нижнего мела на рассматриваемом участке представлены готеривским, барремским и аптским ярусами. Существовавший в меловом периоде морской бассейн перекрывал всю территорию современного города, поэтому распространение отложений определилось, главным образом, дальнейшей денудацией.

В нижней части меловых отложений залегают мелкие серо-зеленые и изумрудные пески, пылеватые, переслаивающиеся с песком тёмно-серым, мелким, сильнослюдистым, относящиеся к *дьяковской свите*, с зафиксированной мощностью 6 м. *Савельевская свита*, представленная песками тёмно-серо-коричневыми и болотно-зелеными, мелкими и пылеватыми, глинистыми, мощностью 2,5 м перекрывается отложениями *гремячевской свиты*. Последняя представлена песками буро-зеленовато-темно-серые от средней крупности до пылеватых, преимущественно мелкие, слюдистые, с прослоями песчаника (мощностью до 0,3 м) и включениями конкреций фосфоритов. Между гремячевской и бутовской свитами выделен слой (до 1 м) темно-серой глины котельниковской свиты. Бутовская свита мощностью 5 м представлена переслаиванием песка светло-серого, светло-коричневого, пылеватого, плотного, слюдистого с глиной буро-коричневого, тёмно-серого и серого цвета с ожелезнением. *Икшинская свита* (Рис. 2б) относится к нижней части аптского яруса и залегает на барремских и готеривских осадках несогласно. Представлена песками светло-серыми, желтовато-серыми, мелкими, с глинистыми прослоями. В средней и нижней части толщи встречаются ожелезненные прослои мощностью до 0,2 м. Состав изученного образца икшинской свиты в целом мономинерален. Это почти на 100% кварцевый песок. Тем не менее, в нём встречаются и зёрна тёмного цвета – больше всего их содержится в мелких фракциях. Пески *ворохобинской свиты* буровато-зеленовато-серые, мелкие, слюдистые, с глинистыми прослоями. Разрез котловского горизонта завершает *волгушинская свита* (Рис. 2а). Нижняя её часть сложена песками средней крупности со стяжениями фосфоритов и сидеритов, выше залегают чередующиеся с алевритистыми глинами зеленовато-серые алевриты. В составе песчаных зёрен преобладают кварц и полевые шпаты (Рис. 2а). У песка волгушинской свиты доминирующая фракция имеет размер более 0,25 мм. В нём преобладает кварц, однако здесь он имеет в основном жёлтую окраску, что является следствием вторичных процессов.

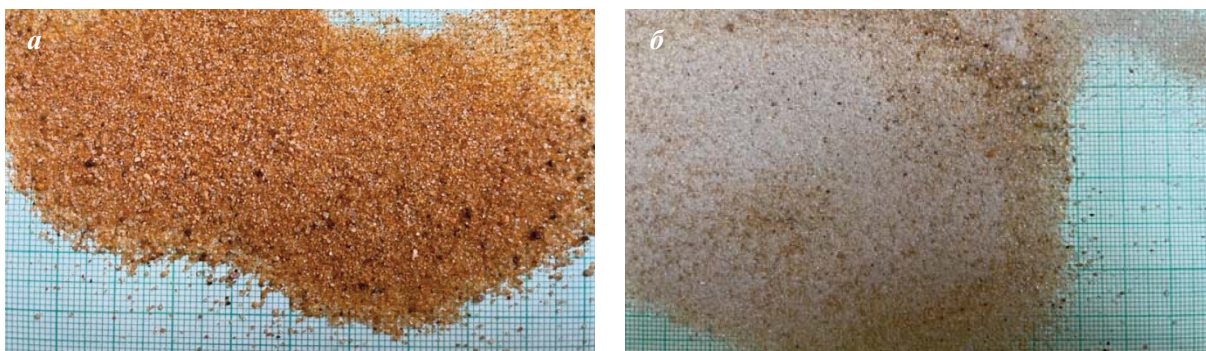


Рис. 2. Общий вид нижнемеловых песков: а – волгушинской свиты, б – икшинской свиты (фото Г.А. Гречко).

Четвертичные отложения, представленные моренными и водно-ледниковыми накоплениями, залегают в верхней части разреза и представлены супесью и мелким песком рыже-бурового, светло-коричневого цвета, с включением дресвы, а в нижней части с большим количеством железистых стяжений.

Результаты исследования. Изучение верхнеюрских и меловых грунтов позволило выявить следующие закономерности. Минеральный состав рассмотренных свит характеризуется уменьшением доли кварца (с 76,0 до 47,3%) и появлением пирита с увеличением глубины залегания, что может быть связано с изменением условий осадконакопления. С этим связано и увеличение дисперсности с глубиной. Наличие ожелезнения в гремячевской и дяковской свитах (Рис. 3) говорит о значительном постгенетическом преобразовании этих отложений.

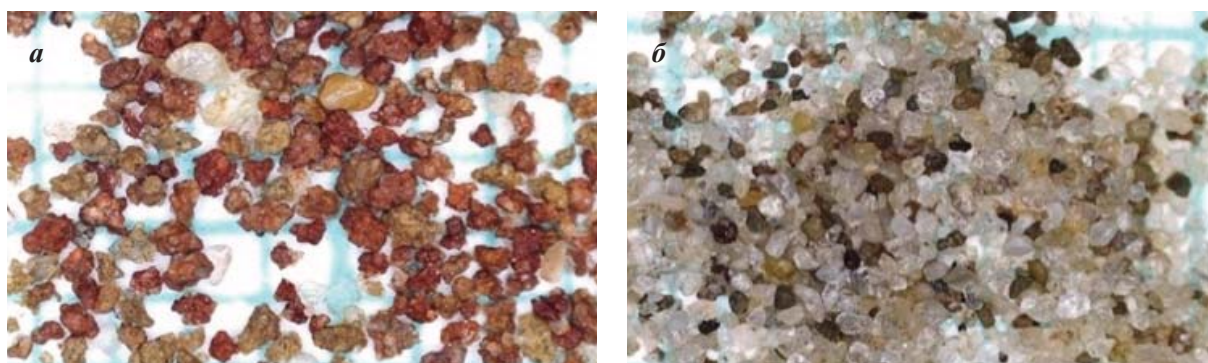


Рис. 3. Фотоизображения фракции 0,25-0,50 мм: слева – пески дяковской свиты; справа – пески гремячевской свиты (фото Г.А. Гречко).

Результаты гранулометрического анализа показали (рис. 4), что пески волгушинской, савельевской и дяковской свит являются монодисперсными, а икшинской и гремячевской, — бидисперсными, что характерно для песков морского генезиса. Доминирующая фракция почти у всех свит имеет размер 0,10-0,25 мм, исключение составляет волгушинская (0,25-0,50 мм).

В некоторых песках встречались зерна более 2 мм, однако их массовая доля составляла менее 1%. Согласно классификации ГОСТ, пески волгушинской свиты охарактеризованы как средней крупности, остальные – как мелкие. Углы естественного откоса песков мелового возраста составили 35-39 градусов. Значения плотности скелета грунта имели сильный разброс. Например, от 1,1 до почти 1,4 г/см³ в рыхлом сложении. Изучение микроскопических изображений помогло выявить огромное морфологическое и минеральное разнообразие. Морфология частиц определялась, в первую очередь, их составом. Например, цельные зёрна кварца оказывались относительно гладкими, окатанными, а зёрна с сидеритовым цементом имели сложную конфигурацию. Распределение различных минералов по фракциям также не было равномерным, содержание кварца почти везде увеличивалось с ростом дисперсности.

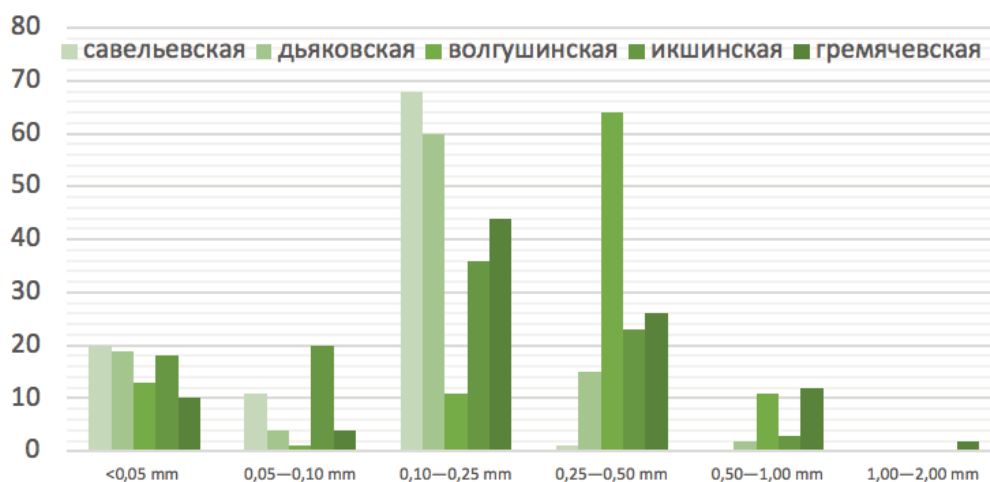


Рис. 4. Гранулометрический состав нижнемеловых песков (%).

Результаты анализа песчаных отложений титонского яруса показали преобладание песчаной фракции – среднего, мелкого и тонкого песка и пылевой – крупной и мелкой пыли, содержание фракции мелкого песка мела. Песок лопатинской свиты плохо отсортирован, с высоким значением коэффициента неоднородности – от 17 до 150. Необходимо отметить большой разброс в значениях коэффициента неоднородности у нижнемеловых песков.

Проведенный анализ показал, что песчано-глинистые верхнеюрские отложения титонского яруса и нижнемеловые преимущественно песчаные отложения характеризуются значительной неоднородностью и высокой изменчивостью как по латерали, так и по вертикали. Это в свою очередь является одним из факторов развития эрозионных и склоновых процессов на рассматриваемом участке Воробьевых гор.

Наличие на склоне вынесенного песчаного материала может свидетельствовать о возможности проявления здесь «оползней, вызванных фильтрационной эрозией (Slides caused by seepage erosion)», [8] когда высота захвата определяется уровнем залегания водоносного слоя и ограничивается верхней частью склона. Так, в монографии [4] описывается теория суффозионного происхождения оползней в районе Воробьевых гор: «Наиболее широко естественная суффозия развита на правом высоком берегу р. Москвы в местах выхода на дневную поверхность горизонта грунтовых вод, заключенного в юрских, меловых и флювиогляциальных песках. На Ленинских горах можно увидеть сотни родников, большинство которых служит очагами суффозии». В настоящее время на склоне Воробьевых гор за метрополитеном, где антропогенное преобразование территории минимально наблюдается несколько подобных участков (Рис. 5).



Рис. 5. Суффозионная полость в средней части склона Воробьевых гор восточнее метрополитена.

Действительно, на территории г. Москвы наиболее отчетливо склоновая суффозия развита на правом высоком берегу р. Москвы в местах выхода на поверхность горизонтов подземных вод, заключенных в верхнеюрских, нижнемеловых и четвертичных песках. Приуроченность суффозии к таким местам можно видеть не только на Воробьевых горах, но и в районе Карамышевской набережной, Сабурово, Фили (Рис. 6) и др. Развитию суффозионного выноса способствует значительное гидродинамическое давление фильтрационного потока. В центральной части Воробьевых гор [4], падение подземного потока, пересекающего оползневые ступени, составляет 20,7 м на протяжении 330 м, средний уклон $i = 0,066$ с более резкими перепадами на участках оползневых бугров. На ряде участков уклон подземного потока возрастает до $i = 0,08 - 0,1$ и более. Вынос из песчаных толщ мелкодисперсного материала (часто слюды) отчетливо виден в средней и нижней части склона.



Рис. 6. Суффозионная полость в нижней части оползневых склонов Москвы (а – Фили, б – Сабурово).

Исследования, проведенные для учета количества выносимого материала, показали, что его объем (речь идет о песках мелового и позднеюрского (волжского) возраста) составляет от 50 до 100 мг/л [4]. Учитывая, что основание склона на протяжении длительного времени было областью разгрузки подземных вод, заключенных в верхневолжских, нижнемеловых и четвертичных флювиогляциальных песчаных породах, при наличии большого количества выходов (источников) суффозионный процесс в геологическом времени мог иметь очень большие масштабы. Можно предположить, что с проявлением суффозии связана серия разнообразных деформаций на упомянутых склонах – образование суффозионных полостей, оползневые деформации и др.

Таким образом, можно уточнить механизм оползневых процессов рассматриваемой территории, в основе которого лежат особенности движения отдельных элементов оползня. В нашем случае можно говорить об одновременном действии нескольких механизмов деформирования грунтов в различных частях склона и о двойной роли песчаных толщ в развитии оползневых процессов на Воробьевых горах.

Головная часть оползневого массива развивается по механизму сдвига крупных блоков, сложенных мезозой-кайнозойскими отложениями, что подтверждается наличием серии плоскостей скольжения, выявленных в толще юрских глин. Мощность таких оползневых блоков на рассматриваемой территории достигает 80-100 м. В этом случае можно говорить о *пассивной* роли песчаных толщ, создающих дополнительную нагрузку на склон в головной части оползня.

Вторым типом оползней, развитых на рассматриваемом склоне, можно считать относительно неглубокие оползни, захватывающие только верхнюю часть разреза, в т.ч. верхнеюрские, нижнемеловые и четвертичные песчано-глинистые отложения, что подтверждается данными бурения, в частности удвоением в разрезе аптских песчаных отложений. В этом случае можно говорить об *активной* роли песков в развитии оползневых процессов – когда в верхних песчаных толщах вследствие изменения их физического состояния и действия гидростатических и гидродинамических сил, происходит развитие деформаций. Таким образом, одной из причин потери устойчивости таких массивов можно считать вынос песков подземными водами и смещение вышележащих пород вследствие потери ими опоры.

В заключении необходимо сказать о сложном механизме развития оползневых процессов рассматриваемого склона – в составе которых можно выделить как первичные, так и вторичные, как с пассивной, так и активной ролью песчаных толщ. При выявлении факторов развития деформаций на склоне Воробьевых гор необходимо обращать определенное внимание на неоднородную толщу песчаных образований, в которой, при определенном градиенте потока возможно развитие суффозионного выноса. Что особенно важно в связи с явным преобладанием в последнее время техногенной суффозии над природной.

Литература

1. Барыкина О.С., Зеркаль О.В., Самарин Е.Н., Гвоздева И.П. К вопросу о развитии оползневых процессов на Воробьёвых горах (г. Москва)/ Матер.конф. Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения. М.: Геомаркетинг, 2017, с. 111-117.
2. Даньшин Б.М. Геологическое строение Ленинских гор в связи с некоторыми вопросами стратиграфии отложений меловой системы и оползневыми явлениями по берегу р. Москвы. Известия Московского геологического треста. (4). 1937, с. 3-23.
3. Зеркаль О.В., Барыкина О.С., Фоменко И.К. Проблемы и современное развитие представлений о крупных оползнях г. Москвы (комментарии к статье М.П. Кропоткина, Н.А. Орловой Крупные оползни Москвы – новые взгляды или новые заблуждения?) // Инженерная геология. 2020. № 4, с. 30-40.
4. Котлов В.Ф. Изменения природных условий территории Москвы под влиянием деятельности человека и их инженерно-геологическое значение. М.: АН СССР, 1962. 263 с.
5. Кюнцель В.В. О возрасте глубоких оползней Москвы и Подмосковья, связанных с юрскими глинистыми отложениями. Бюлл. Моск. об-ва исп. природы. Отд. геол., XL (8), 1965. С. 93-100.
6. Павлов А.В. Докладная записка Московской Городской управе о строении местности по линии напорный резервуар - Яхт-клуб – Москва-река и о причинах сползания нагорного откоса между напорным резервуаром и восточным краем с. Воробьева. Городская типография. Москва. 1911.
7. Павлов А.П. Заметка об образовании оползней в глинистых и глинисто-песчаных породах. Бюлл. МОИП. 1910. №4, с. 29-32.
8. Hutchinson J.N. General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology//Proc. of the Fifth International Symposium on Landslides/C.Bonnard, ed. - Rotterdam: Balkema, 1988. V. 1, pp. 3-35.
9. New data on geological conditions of landslide activity on Vorobyovy Gory (Moscow, Russia) / O. Barykina, O. Zerkal, I. Averin, E. Samarin // Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk. Vol. 2. Cham, Switzerland: 2021, pp. 143–148.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУР ГРУНТОВОГО МАССИВА НА УЧАСТКАХ РАЗВИТИЯ ОБРАЖНОЙ ТЕРМОЭРОЗИИ В ПТС КРИОЛИТОЗОНЫ

А.В. Быкова, И.В. Абатурова

Уральский государственный горный университет,
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д.30. E-mail: a.bykova.ygd@gmail.com

В криолитозоне сбалансированность природных процессов основана на постоянстве мерзлотных условий почв и грунтов, которое сохраняется при ведении традиционного землепользования. Промышленное освоение территорий Крайнего Севера приводит к изменению природных потоков вещества и энергии, активизации экзогенных геологических процессов, что влияет на эксплуатационную надежность сооружений и приводит к нарушению земель [1].

Комплексные исследования ображной термоэрозии как одного из экзогенных процессов в природно-технических системах (далее – ПТС) криолитозоны начались в 70-х гг. XX в. и связаны с разработкой газовых месторождений Западной Сибири [1-3]. Проведенный анализ работ показал, что несмотря на изученность вопроса, проблема оценки причин и условий, а также прогноза развития ображной термоэрозии в ПТС криолитозоны в настоящее время остается актуальной.

В работе представлены результаты исследований эрозионных процессов на территории Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения (далее – НГКМ), расположенного на Тазовском полуострове, в пределах зоны тундры подзоны субарктических тундр. Месторождение представляет собой Ямбургский территориально-производственный комплекс, а именно локальную ПТС, содержащую множество элементарных ПТС [4]. На Рис. 1 схематически показана элементарная ПТС Ямбургского НГКМ, в которой развиваются эрозионные процессы. Схема разработана на основе представлений о взаимодействии геологической среды с технической системой, приведенной в работе [5].

Техническая часть системы - совокупность инженерных сооружений различного назначения: установки комплексной подготовки газа, кусты газовых скважин, газосборная сеть, автодороги [6, 7]. Природные условия характеризуются суровым субарктическим климатом, слабым почвенно-растительным покровом незначительной мощности, умеренно-расчлененным рельефом. Основанием геологической среды являются повсеместно распространенные многолетнемерзлые породы с температурами до -7° и небольшим слоем сезонного оттаивания. Они представлены высокольдистыми и легко размываемыми дисперсными грунтами [7].

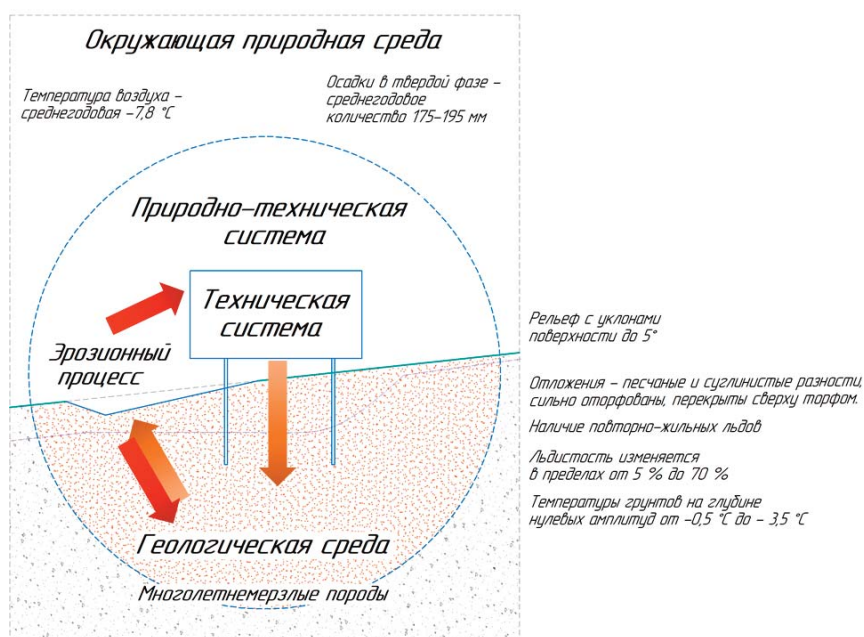


Рис. 1. Развитие эрозионных процессов в ПТС Ямбургского НГКМ.

В верхней части литосферы граница ПТС определяется размером зоны воздействия технического сооружения на геологическую среду. Строительство сооружений на склонах криолитозоны изменяет компоненты геологической среды. Трансформация природных условий, неустойчивых к образованию отрицательных форм рельефа, приводит к зарождению и развитию эрозионных процессов. Затем эрозионные процессы начинают оказывать влияние на техническую часть и природные компоненты.

Активный рост овражных нарушений на территории месторождения зафиксирован в весенний период 2007 г., когда объем большинства оврагов увеличился от 30% до 50% относительно предыдущего значения. Это создало угрозу для сооружений техносферы, находящихся в зоне влияния оврагов и было принято решение ликвидации овражных проявлений.

Для проведения противоэрозионных мероприятий необходимо понять *механизм развития оврагов в условиях ПТС криолитозоны*. Согласно современным представлениям об эрозионных процессах, возникновение и активность развития овражных форм определяется всем комплексом природных характеристик территории - не существует ведущего природного фактора образования оврагов [1-3, 7-9].

В период 2008–2015 гг. были выполнены комплексные исследования [7]. Они включали инженерно-геологическую съемку, снегомерные наблюдения, измерения температур грунтов на семи ключевых участках элементарных ПТС с развитием крупных эрозионных форм [7]. Исследования выполнялись в соответствии с моделью годового цикла эрозионных процессов для условий Ямбургского НГКМ, разработанных ранее [8].

Оценка результатов комплексных исследований проводилась с использованием инструментов корреляционного анализа [10]. В качестве компонентов приняты среднезимняя температура воздуха $T_{в\,срз}, ^\circ C$; высота снежного покрова по полевому маршруту $H_{м}$, см и по оврагу $H_{ов}$, см; коэффициент схода снежного покрова по водосборной площади K , см/сут; среднегодовая температура грунтов $T_{гр}, ^\circ C$. Параметром, определяющим темпы роста и замедления эрозионных процессов, выбран годовой коэффициент прироста площади овражной системы K_s в долях единиц.

Из выбранных компонентов температура грунтов имеет особое значение, поскольку она является уникальной характеристикой ключевого участка, тогда как остальные компоненты определяют территорию всего месторождения в целом. Для получения данных о температурах грунтов была оборудована сеть термометрических скважин, позволяющая получить информацию о температурном режиме в теле оврага, на участках, прилегающих к бровке и на ненарушенных частях площади водосбора. Измерения температур выполнялись четыре раза в год [8].

Корреляционный анализ выполнялся с использованием программного продукта IBM SPSS Statistics. Результаты математической обработки данных полевых измерений показали неоднородные результаты для различных элементарных ПТС. Рассмотрим два типовых оврага: овраги № 7 и № 1.

Овраг №7 расположен на правом берегу р.Нгарка-Пойловояха, источники питания оврага – заболоченные участки в районе свайного поля газопроводов-шлейфов сантропогенно-нарушенной тундровой растительностью, представленной небольшими кустарниками, торфами и мхами.

Матрица коэффициентов парной корреляции для оврага №7, свидетельствует о тесной взаимосвязи между температурами грунтового массива вдоль бровок оврага, параметрами среды и темпами прироста площади овражной системы (табл. 1). Это обусловлено геологическими условиями участка расположения оврага, а также особенностями техносферы, к которой он прилегает.

Матрица парных коэффициентов корреляции для оврага № 7							<i>Таблица 1.</i>
	K_s	$T_{гр}$	$T_{в\,срз}$	H_m	$H_{ов}$	K	
K_s	1	0,915*	0,833*	0,683	0,921*	0,976**	
$T_{гр}$		1	0,702	0,814*	0,915*	0,945**	
$T_{в\,срз}$			1	0,749	0,925*	0,858*	
H_m				1	0,880*	0,745	
$H_{ов}$					1	0,962**	
K						1	
* - корреляция значима на уровне 0,05 ** - корреляция значима на уровне 0,01							

Грунты, слагающие овраг № 7, представлены песками мелкими с редкими линзами песков пылеватых и средней крупности, супесей и суглинков мощностью до 1 м. Вдоль левого борта оврага и при-вершинной части пески перекрывают современные биогенные отложения - торфами. Торфа залегают с поверхности до глубины 3,2 м. Грунты находятся в многолетнемерзлом состоянии, также развито морозное пучение с формированием жильного льда в слое сезонного оттаивания и промерзания.

Техногенное влияние на овраг № 7 оказывается опосредовано, через изменение режима снего-накопления-снеготаяния на водосборной площади, занятой техносферой (около 50% площади водосбора). Результаты измерений свидетельствуют высокой взаимосвязи значений температур грунтов с режимом снегонакопления-снеготаяния для оврага № 7.

Для оврага № 1, расположенного на крутом, подмываемом заросшем склоне озерно-аллювиальной равнины, значения коэффициентов парной корреляции представлены в табл. 2.

Матрица парных коэффициентов корреляции для оврага № 2							<i>Таблица 2.</i>
	K_S	T_{cp}	$T_{\theta_{cpz}}$	H_m	H_{os}	K	
K_S	1	0,691	0,334	0,661	0,644	0,680	
T_{cp}		1	0,712	0,574	0,854*	0,963**	
$T_{\theta_{cpz}}$			1	0,749	0,925*	0,858*	
H_m				1	0,880*	0,745	
H_{os}					1	0,962**	
K						1	
	* - корреляция значима на уровне 0,05						
	** - корреляция значима на уровне 0,01						

В геологическом строении участка до исследуемой глубины в 10 м, принимают участие отложения зырянского горизонта, которые представлены песками мелкими, пылеватыми и супесями твердомерзлыми, массивной криогенной текстуры. Пески в разрезе преобладают и залегают большей частью, с поверхности. Супеси слагают среднюю и нижнюю части разреза. Вскрытая мощность супесей до 7,5 м. Температура грунтов по участку изменяется от минус 0,6°С до минус 3,2°С. Глубина сезонного оттаивания грунтов колеблется от 1,5 до 3,2 м.

Несмотря на высокую взаимосвязь между компонентами среды, влияние температуры грунтов на прирост оврага № 1 существенно ниже, чем для оврага № 7. Это связано не только с геологическими условиями участка, но и с масштабом техногенного воздействия. Техносферу составляют насыпные площадки под основанием кустов газовых скважин, насыпь подъездной автодороги, газовые скважины, трубопроводы обвязки газовых скважин. В период наблюдений на участке проводились противоэрозионные мероприятия, что уменьшило коэффициент прироста площади овражных нарушений.

Рассмотрим подробнее результаты измерений температур грунтов оврага № 1 для разных элементов овражной системы. На Рис. 2 приведена динамика температур грунтов в теле оврага, на участках, прилегающих к бровке. Скважины №№ 1-3 расположены в теле овражной системы, где высота снежного покрова к концу зимнего периода составляет до 2,0-2,5 м. Скважины №5, № 8 приурочены к участкам вдоль бровок оврага на участках, где снежный покров не превышает 40-50 см.

Представленные данные можно интерпретировать следующим образом. К моменту наступления снеготаяния в прирусловой части водосбора и руслах оврагов накопление снега приводит к сосредоточению водоотдачи. При таянии именно поверхностный сток является главной причиной направленной эрозионной деятельности, так как подповерхностных стоков отсутствует за счет наличия мерзлого основания или пренебрежимо мал.

Однако в русле оврага, где накапливается мощный слой снега, температура пород в слое сезонного оттаивания составляет десятые доли градусов в отрицательных значениях, тогда как в бортах оврагов, не занесенных снегом она достигает -4...-12°С (графики от 13.04.2013). В результате талые воды без потерь на оттаивание концентрируются на дне оврага и вдоль заполненных снегом бровок

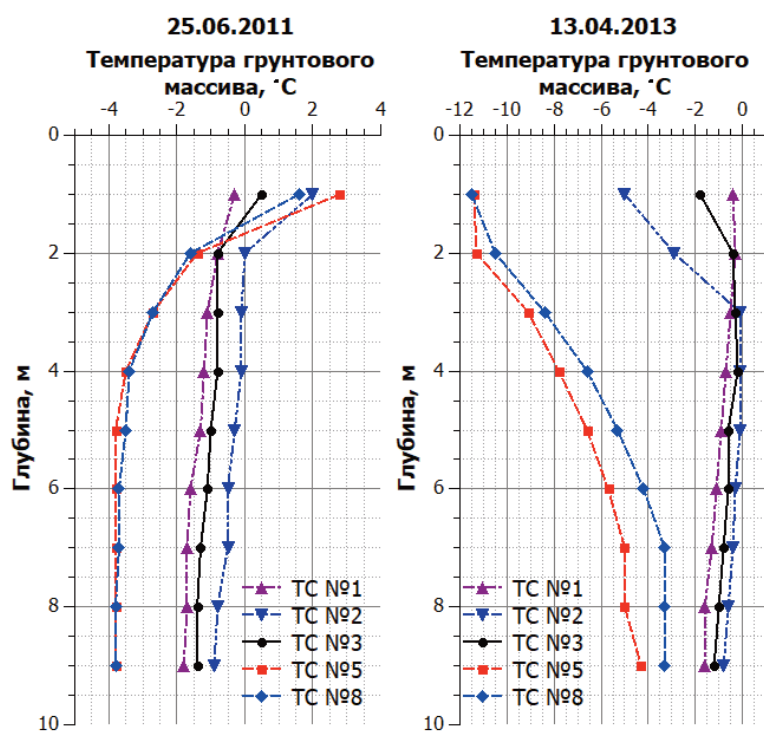


Рис. 2. Динамика температур грунтов для оврага № 1.

и эродировать грунт. Неоднородность температур грунтов сохраняется и после схода снежного покрова (графики от 25.06.2011) до окончания летнего периода.

В результате проведенных исследований можно утверждать, что температуры грунтового массива участков развития овражной термоэрозии являются важным компонентом, с использованием которого можно выполнить качественную и количественную оценку процессов оврагообразования в условиях Ямбургского НГКМ. Полученные в работе матрицы парной корреляции для различных ключевых участков элементарных ПТС позволят провести регрессионный анализ — составить уравнение взаимосвязи между темпами прироста оврагов и температурами грунтового массива. Все вышперечисленное подчеркивает важность изучения температур грунтов при решении задач прогноза развития овражной термоэрозии в ПТС криолитозоны.

Литература

1. Ананников А.Г., Ставкин Г.П., Лобастова С.А., Хабибуллин И.Л. Экологические основы землепользования при освоении и разработке газовых и газоконденсатных месторождений Крайнего Севера. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000, 315 с.
2. Познанин В.Л. Природа овражной термоэрозии: специальность 04.00.07 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение»: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук / Познанин Валентин Львович; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. - Москва, 1995, 35 с.
3. Баранов А.В. Геоэкологические основы развития и предупреждения водноэрозионных процессов в криолитозоне при промышленном освоении газовых месторождений полуострова Ямал: специальность 25.00.36 «Геоэкология»: диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук / Баранов Александр Владимирович; ООО Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий «ВНИИГАЗ» - Москва, 2002, 401 с.
4. Бондарик Г.К. Инженерная геология. Вопросы теории и практики. Философские и методологические основы геологии / Г. К. Бондарик, Л. А. Ярг. – М.: ИД КДУ, 2015, 296 с.
5. Королев В.А. Мониторинг геологической среды. М.: Изд-во МГУ, 1995, 272 с.
6. Геотехнические и геоэкологические проблемы территории Ямбургского газоконденсатного месторождения / В. И. Гребенец, А. А. Найденко, В. А. Толманов и др. // Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых - РУДН Москва - Москва, 2017. С. 448–453.

7. Абатурова, И.В. Методы мониторинга экзогенных геологических процессов в природно-технических системах / И.В. Абатурова, А.В. Быкова // Инженерная и рудная геофизика 2020 : 16-я научно-практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020», Пермь, 14–18 сентября 2020 года. – Пермь: Общество с ограниченной ответственностью «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2020. – С. 67. – DOI 10.3997/2214-4609.202051086.
8. Быкова А.В. Геотехнический мониторинг термоэрозивно-эрозионных процессов и оврагообразования в природно-технических системах криолитозоны/ Быкова А.В., Лобастова С.А., // Материалы Международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной 20-летию ООО НПО «Фундаментстройаркос». Тюмень, 2011, с. 321–324.
9. Зорина Е.Ф. Овражная эрозия: закономерности и потенциал развития. М.: изд-во ГЕОС, 2003, 170 с.
10. Шпаков П.С. Математическая обработка результатов измерений: учеб. пособие / П. С. Шпаков, Ю. Л. Юнаков. – Красноярск :Сиб. федер. ун-т, 2014, 410 с.

ИСТОРИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА РОСТОВА-НА-ДОНУ

А.В. Гридневский

Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д.1. E-mail: a328@ya.ru

Территория г. Ростова-на-Дону, площадью 400 км², располагается в пределах Дон-Тузловского междуречья над Ростовским выступом Украинского кристаллического щита. В этой области проявляется целый спектр геодинамических процессов: оползни, деформации земной поверхности, суффозия, просадка лессовых грунтов, овражно-балочная эрозия, разрушение речного берега. Они обусловлены факторами, сложившимися в ходе геологического развития и техногенеза. Ряд признаков указывает на изменения в рельефе города, не связанные напрямую с инженерной деятельностью. Мониторингом, выполненным в течение двух лет методом дистанционного зондирования земли, установлено групповое изменение абсолютных отметок зданий и сооружений на участках площадью несколько сотен гектаров. Частой причиной таких деформаций бывает просадка лессовых грунтов из-за подтопления. Но, в рассматриваемом районе отсутствует замачивание грунтов и просадочные деформации. Для выяснения причин групповых осадок на больших площадях целесообразно глубже исследовать геологическую составляющую этого феномена.

В настоящей статье анализируется возможность проявления новейших неотектонических движений, провоцирующих медленное и устойчивое нарастание вертикальных деформаций поверхности земли. С этой целью исследуются историко-геологические аспекты развития и роль в состоянии геологической среды города.

Методика исследований

Выполнен историко-геологический анализ с использованием опубликованных материалов геофизических исследований, геологических и неотектонических карт региона. Изучены результаты инженерно-геологических изысканий в городе за последние 50 лет. Выполнены расчеты вертикальных смещений земной поверхности по материалам георадиолокационной интерферометрической съемки.

Обзор исследований

В региональных тектонических картах Ростовской области Н.И. Погребнова, И.И. Потапова и др. [14] впервые показано взаимоотношение Русской платформы и Предкавказской плиты, а также выделено юго-восточное погружение Украинского кристаллического щита. В карте глубинного строения Азово-Каспийского региона под редакцией Муратова М.В. [12] подробно отражена подробно описана система глубинных разломов, детализировано строение Скифской плиты. В 1976 г. Мовшовичем Е.В., Вальбе С.П. и др. [10] для Ростовской области разработаны карты глубин залегания кристаллического фундамента, подошвы меловых отложений, основных разломов, выделены структурные элементы границы Восточно-Европейской и Скифской платформ. Зайцев А.В., Грановский А.Г. и др. [5] разработали карты тектонического районирования комплексов докембрия Ростовской области. Экнадиосянцом Э.К., Мовшовичем Е.В. и др. [11,18] картировались геодинамические процессы фанерозоя в Ростовской области. Хаин В.Е. [16,17] сделал крупные обобщения геоданных по тектонической эволюции Черноморско-Каспийского региона в фанерозойском зоне. С 1986 г. в России издаются карты современных вертикальных движений земной коры.

Геологическое строение

Территория г. Ростова-на-Дону проецируется на Ростовский выступ погружения Украинского кристаллического щита, который отделен с севера от палеозойских структур Донбасса Персиановско-Маньчским надвигом. На юге выступ граничит с Предкавказскими складчатыми сооружениями (Песчанокопский и Кушевский разломы). В восточном направлении он погружается в виде

ступенчатых блоков и соприкасается со структурами Скифской плиты по Бейсугской шовной зоне и Сальскому валу. Выступ имеет две положительные структуры: Приазовский мегаблок и Азовский купол. С запада Приазовский мегаблок граничит с Латоновским синклиналием по Миусскому разлому. С востока к нему примыкает Синявская синклиналь, и далее – Азовский купол, который отделяется с востока Зерноградско-Мечетенской шовной зоной (Рис. 1).

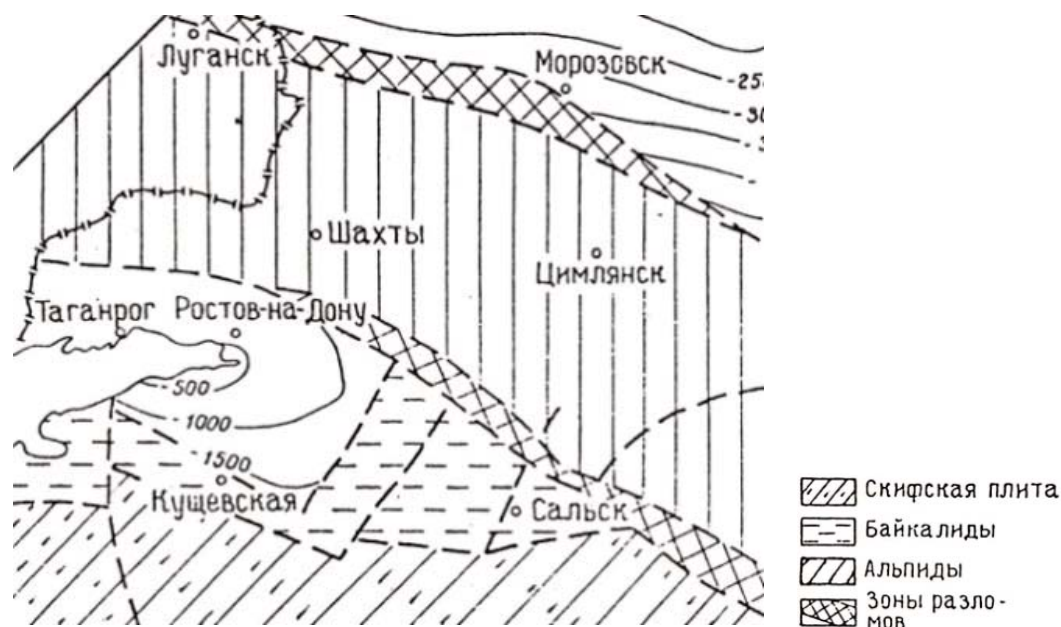


Рис. 1. Схематическое строение докембрийского фундамента; изолинии – глубины залегания кристаллического фундамента [4].

Вершина Азовского купола расположена под территорией города Азова и охватывает на глубине 500 м площадь 30x35 км². Территория Ростова-на-Дону также находится над куполом и удалена от г. Азова на 20 километров. Периферийная часть структуры погружается до глубин 5-7 км на удалении от 80 до 280 км.

Геологическое строение и история

Азовский купол имеет архейское ядро и протерозойское обрамление. Толща докембрийских отложений стратифицирована [5]. Нижний структурный этаж сложен наиболее древними архейскими метабазит-амфиболами. В его структуре выделены куполообразные поднятия плагиогранит-мигматитов размером от 40 до 100 км². Они вскрыты около г. Таганрога, ст. Кагальницкой и п. Усть-Койсуга – пригорода г. Ростова-на-Дону.

Во втором этаже – архей-нижнепротерозойском – распространены вулканогенно-тектонические впадины, заполненные железисто-кремнисто-сланцевым материалом. Ближайшая из них, площадью 5x35 км², примыкает к северной границе г. Ростова-на-Дону и вытянута в направлении на северо-восток. В 55 км восточнее города расположена Зерноградско-Мечетенская шовная зона. Вовремя Карельской складчатости здесь формировались мигматиты и поступал мантийный материал в виде гранитных интрузий (Рис. 2).

Третий – позднепротерозойский – структурный этаж включает отложения конгломератов группы трахи-андезит-липаритов [5, 9], перекрытых алевролитами, сланцевыми породами и базальтовыми покровами. Завершают разрез позднего протерозоя конгломераты и песчаники морского бассейна, существовавшего до конца рифея. Эти отложения пронизаны крупными гранитными массивами: Нижнедонским – 10 км восточнее и Еланчикским – 100 км западнее от территории г. Ростова-на-Дону (Рис. 2).

К исходу докембрия территория г. Ростова-на-Дону граничила с залегавшими севернее локальными поднятиями и понижениями, заполненными обломочным материалом. По дизъюнктивным нарушениям, вдоль русла Дона, они контактировали на юге с метаморфическим комплексом архейско-нижнепротерозойского возраста.

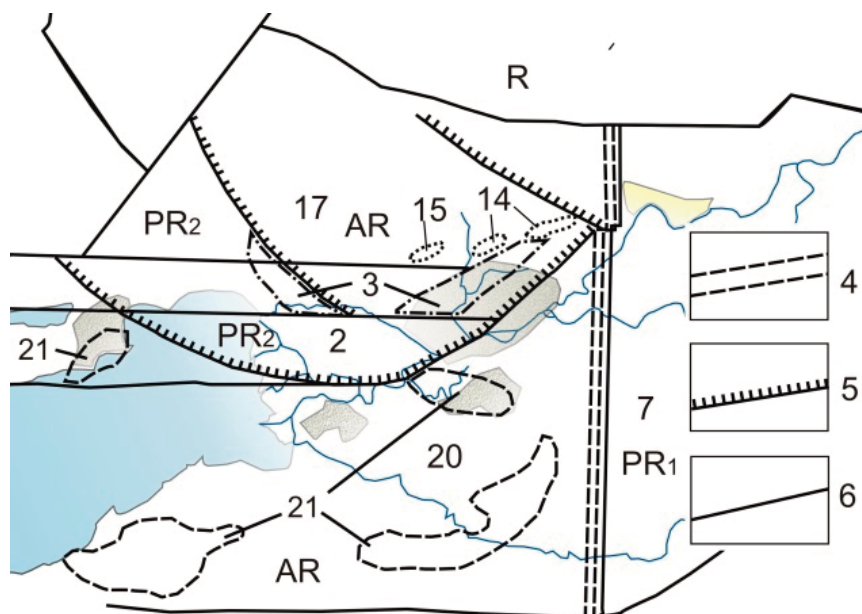


Рис. 2. – Фрагмент тектонической карты докембрия Ростовского выступа [11]; 4 – мегаблоковый шов, 5 – сбросы, грабены; 6 – глубинный разлом; 7 – Нижнедонской гранитный массив (PR₁); формации наложенных впадин: 2 – алеврито-сланцевая (PR₂), 3 – конгломерат-песчаниковая (PR₂); 14 – железисто-карбонатно-сланцевая (PR₁), 15 – железисто-кремнисто-сланцевая (PR₁), 17 – купола гранит-плаггиомигматитовые (AR), 20 – купола мигматит-плаггиогранитные (AR), 21 – выступ основания метабазит-амфиболитового (AR).

В начале рифея (RF₁) по субширотным разломам произошел раскол Восточно-Европейской платформы с последующим образованием рифта шириной до 200 км. Сальско-Ремонтненский и Ростовский блоки отделились со смещением на юг [3]. Последующая стабилизация продолжалась в венде – девоне.

В начале девона, по мере развития каледонской эпохи складчатости, активизировались горизонтальные растяжения и глыбовые подвижки.

С развитием герцинской складчатости, в раннюю эпоху каменноугольного периода (турнейский и визейский века) фаза растяжения сменилась горизонтальным сжатием в северо-западном направлении. Компенсационное погружение земной коры обеспечивало накопление морских, а позже терригенных осадков. Океаническая кора закрылась к башкирскому веку (C_{2b}).

В триасе (киммерийская складчатость), из-за давления Предкавказских плит, активизировались деформации и магматические процессы. В Донбассе образовались надвиги, поперечные разломы, насыщенные магматическими телами основного состава. Дислокации пластов асимметричны: более крутопадающие крылья обращены на юг. В раннем триасе образовался субширотный Таганрогский шов [16], проецирующийся на территорию г. Ростова-на-Дону. В 25 км севернее сформировался субширотный Персиановский надвиг.

В средней и верхней юре (J₂₋₃) у западной границы Ростовского выступа активизировался магматизм. В глубинных разломах (80 км западнее Ростова-на-Дону) образовалось Миусское дайковое поле субмеридианального простирания [9].

К началу мелового периода тектоническая активность утасла, установился платформенный режим. Над Ростовским выступом накапливались мезо-кайнозойская толща платформенного чехла, называемая Ростовским сводом. Он простирается на 100-150 км с амплитудой до 500 м. В пределах Ростовского свода выделены все ярусы верхнего отдела меловой системы. Они представлены мергелями зеленовато-серыми, глинами и мергелевидными глинами, алевролитами, известняками, мелом. Общая мощность отложений до 250 м.

Трансгрессивно-регрессивные циклы Альпийского тектогенеза оставили Ростовском выступе эрозионно – аккумулятивные рельефы [4]: олигоцен-среднемиоценовый (P₃-N₁²), сарматский (N₁²⁻³), мэотис-понтический (N₁³), иммерий-акчагыльский (N₁¹⁻²), четвертичный (Q). Они помогают выяснить кинематику тектонических процессов.

Начиная с палеоцена, с раскрытием Восточно-Черноморской глубоководной впадины, на рассматриваемую территорию распространялась трансгрессия, которая оставила после себя отложения

глин, песчаников, известняка и песка. В них, до начала позднего олигоцена, сформировалась наиболее древняя поверхность. В пределах территории г. Ростова-на-Дону она погребена на глубине 160 м.

В конце эоцена – начале олигоцена Альпийская система вступила в орогенный этап развития [16]. С зарождением Индоло-Кубанского прогиба образовался обширный майкопский бассейн (P_3-N_1mk). Его отложения представлены темно-серыми, плотными глинами. В пределах территории Ростова-на-Дону вскрытая мощность оставшихся осадков составляет 10-25 м. Кровля отложений устанавливается бурением на абсолютных отметках -30÷-40 м.

После трансгрессий среднего миоцена земная поверхность испытала подъем. В этот период накапливались аллювиальные и прибрежно-морские осадки конкского (N_1^2kg) и караганского (N_1^2kn) горизонтов. Их кровля обнаружена в пределах Ростовского свода на отметках -10÷-20 м. Береговая линия караганского моря достигла берега современного Таганрогского залива и русла Дона. Граница же конкского бассейна продвинулась севернее, к открытому Донбассу [1].

В верхнем миоцене, из-за образования Транскавказского меридионального поднятия, произошел распад Понто-Каспийского бассейна [16, 17]. В отделившихся морских водоемах накапливались отложения сарматского и мэотического ярусов. Нижнесарматский (N_1s_1) морской бассейн отделился от Океана Тетис. В его восстановительной среде образовались темноокрашенные глинистые отложения. Среднесарматское (N_1s_2) море занимало максимальную площадь, отличалось большей аэрацией и накоплением известняков-ракушечников. В верхнем сармате (N_1s_3) бассейн обмелел. Для этого времени характерны речные, дельтовые и прибрежные, отложения. В 10 км восточнее г. Ростова-на-Дону залегают аллювиальные пески верхнего сармата – продукт регрессии моря, продолжавшегося до ранне мэотического времени (9,5-7 млн лет назад). Отложения сарматского регионаруса встречаются повсеместно на территории г. Ростова-на-Дону на абсолютных отметках от -50 м до +28 м (Рис. 3). В центре города кровля сармата залегает на отметках +10÷18 м с локальными понижениями до +4÷6 м к западу от долины р. Темерник. Низкое залегание кровли отмечается у правобережья р. Дон, что указывает на дифференцированные тектонические движения и интенсивную эрозию полосы шириной 3-6 км у правобережья Дона. До позднего мэотиса (N_1m_3) территория Нижнего Дона представляла собой сушу, в пределах которой существовала речная долина.

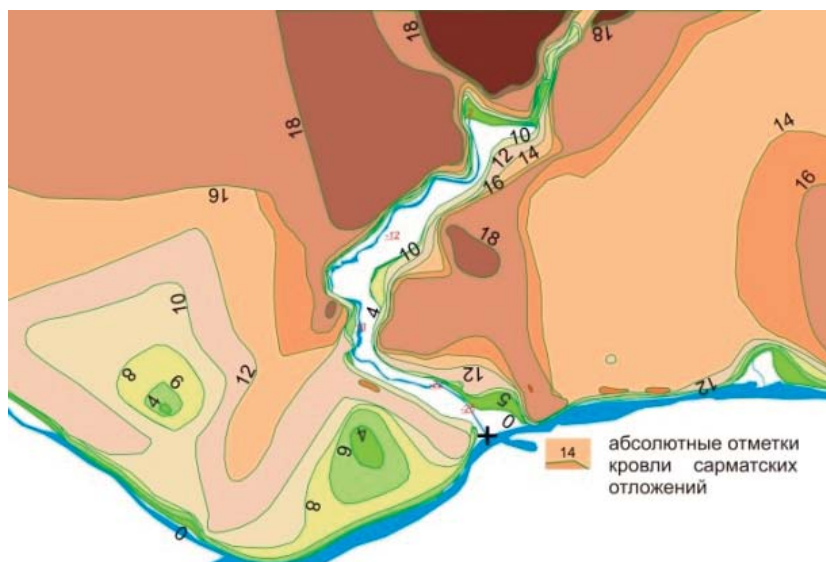


Рис. 3. Кровля сарматских (N_1s) отложений территории г. Ростова-на-Дону.

Новый трансгрессивный цикл начался в первой половине позднего мэотиса и достиг максимума в его второй половине. К этому времени сформировался Танаисский залив [15]. На территории г. Ростова-на-Дону отлагались пески, глины, мергели, известняки. Кровля отложений в пределах города находится примерно на одинаковых абсолютных отметках (+30÷35м).

В позднем миоцене осадочные отложения Ростовского свода испытывали дифференцированные вертикальные движения, выразившиеся в подъеме его северо-западной части. [15]. После незначительного регрессионного перерыва и денудации сформировался самый крупный миоценовый морской бассейн – нижнепонтический (N_1p_1). Его осадки представлены на территории города извест-

няками-ракушечниками с кровлей на абсолютных отметках 39÷43 м. Выходы отложений наблюдаются в речных долинах Темерника и Дона. Процесс осадконакопления завершился 5,9 млн лет назад, к началу верхнего понта (N_{1p_3}) и сменился континентальным режимом.

Кровля морских отложений мзотиса и понта в пределах Ростова-на-Дону имеет минимальные перепады высот (3-5 м), что указывает на отсутствие локальных дифференцированных движений в этот период времени.

В плиоценовую эпоху тектонические движения активизировались в связи с развитием Кавказской складчатости. Деформации развивались по древним разломам Ростовского выступа, меняя при этом гипсометрию отложений осадочного чехла. В конце понтического и начале киммерийского веков (N_{1p_3} - N_{2km}) произошла регрессия из-за восходящих движений земной коры. Эрозионные углубления сформировались в понтических горных породах. Выходы террасы на поверхность прослеживаются в Таганрогском заливе на отметках +40÷55 м. В ходе регрессии проявились дифференцированные движения, которые привели к образованию на территории города речной долины. Она углубилась на 15 м и теперь залегает на абсолютных отметках +25 м.

Во время последовавшей акчагыльской (N_{2ak}) трансгрессии (3,3 млн лет назад) на рассматриваемой территории господствовал континентальный режим. Долина Дона заполнилась песчаным аллювием до отметок +30÷35 м и впадала в море почти в современном устье. Она имела в черте города широтное направление, а правый берег располагался на 3÷6 км севернее современного. Кровля акчагыла в Ростове-на-Дону залегает на отметках +24÷34 м, подошва – на отметках +13÷25 м. В 10 км южнее города мощность аллювия акчагыла составляет 100 м [1], что указывает на интенсивные и неравномерные движения земной коры, отклонявшей русло древней реки к югу.

Эоплейстоценовая (апшеронская) долина Дона заполнилась песчаным аллювием. В более позднее время она постепенно смещалась к северу под влиянием восходящих движений Сальского вала, Сальско-Маньчского и Доно-Сальского поднятий. В условиях установившегося ранее континентального режима формировались скифские глины (EIIsk).

В неоплейстоцене большое влияние на формирование поверхностей выравнивания оказывали великие оледенения. От них зависело положение уровня мирового океана и морей, являвшихся базисами эрозии для речных систем. В ходе черноморских регрессий уровень моря опускался на глубину 30-100 м ниже современного. Азовское море отступало, а русло Дона пересекало его современную территорию и устремлялось к Керченскому проливу [1,13]. Долина нижнего Дона переуглублялась до абсолютных отметок -40÷-50 м. В этот период сложился современный облик рельефа Ростова-на-Дону.

Неотектоника

Новейшие тектонические структуры Ростовской области формировались на протяжении нижнего олигоцена–четвертичного периода (~23 млн лет) [11]. На рассматриваемой территории проявились преимущественно пликативные нарушения. Их существование обусловлено каркасом, сложившихся ранее докембрийских образований и событиями Кавказского орогена.

В пределах Ростовского свода и ближайшем окружении территории г. Ростова-на-Дону в структурах мезо-кайнозоя расположены месторождения газа: Азовское (K_2s-st), Синявское (P_2^{1-2}), Ростовское (P_2^{1-2}), Тузловское (P_2^{1-2}), Обуховское (P_3). Они сконцентрированы в одноименных локальных поднятиях в радиусе 10-20 км. Продуктивные отложения эоцена и олигоцена экранируются майкопскими глинами. Рассматриваемые структуры образовались по крайней мере в начале миоцена, то есть раньше ем дислокации сарматско-понтических отложений. Согласно исследованиям, положительные структуры месторождений газа обусловлены слабыми восходящими движениями блоков архейско-протерозойского Ростовского выступа [2].

В киммерийское время (N_{2km}) начался общий подъем Большого Кавказа под влиянием давления со стороны Аравийской микроплиты [16]. В этот период образовались пологие положительные структуры широтного простирания. Ближайшими к территории Ростова-на-Дону поднятиями являются Новочеркасское, Таганрогско-Ростовское и Батайское (Рис. 4а). Они разделены Хапровским, Западно-Маньчским и Кагальницким прогибами и представляют собой антиклинали отложений сарматского и понтического региоарусов. Новочеркасское поднятие проецируется на северное крыло Ростовского выступа. Его южный склон полого опускается к Хапровскому прогибу, имеющему ширину 4÷6 км. Прогиб простирается от Миусского лимана, вдоль северного берега Таганрогского

залива, долины р. Мертвый Донец и пересекает северную окраину г. Ростова-на-Дону. К югу, в черте города, прогиб сменяется широтным Таганрогско - Ростовским поднятием шириной 5-7 км. На востоке, у р. Аксай, оно смыкается с Багаевским поднятием. С юга примыкает Западно-Манычский прогиб (ширина 5-10 км), вдоль которого трассируется долина реки Дон. У южного борта долины прогиб сменяется Батайским поднятием, которое в свою очередь, прерывается с юга прогибом и долиной р. Кагальник. Следуя колебательным вертикальным движениям, плиоценовые аллювиальные потоки мигрировали в меридиональном направлении (Рис. 4б). В зависимости от знака вертикальных смещений поверхности земли, они меняли направление своего перемещения и оставляли материальные следы тектонических деформаций.

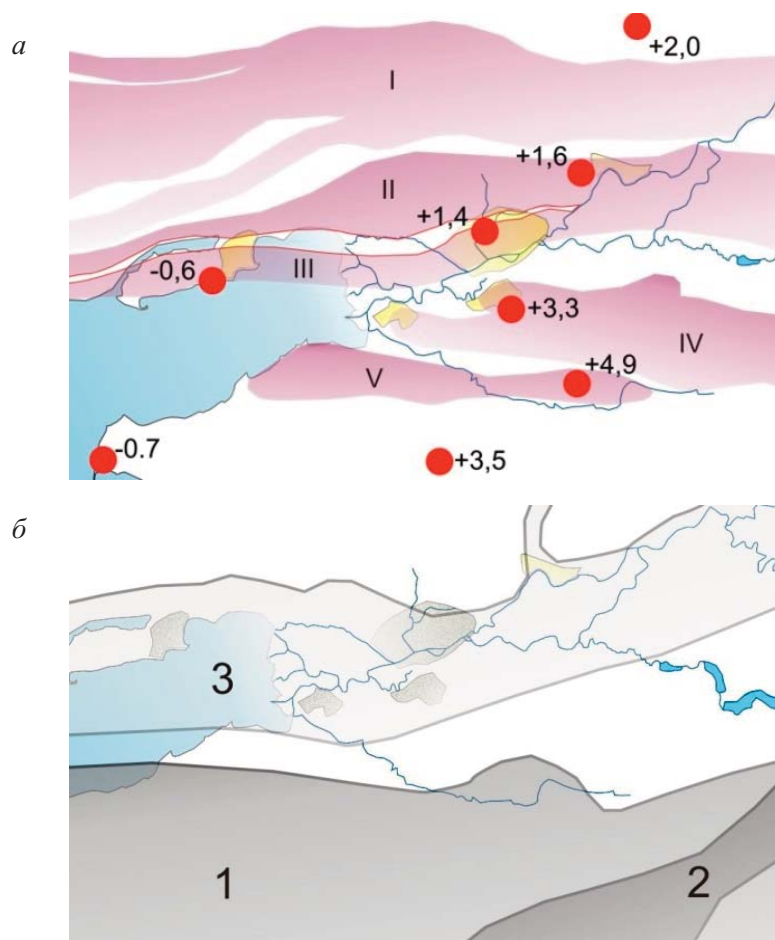


Рис. 4. Новейшие движения земной коры; а – вертикальные смещения: красные точки – места измерений, мм/год [7]; цветом показаны области локальных поднятий в Ростовском своде: I-Несветаевское, II-Новочеркасское, III-Таганрогско-Ростовское, IV-Батайское, V-Канеловское [8]; б – миграция аллювиальных палеоврезов плиоцена: 1 – поздний киммерий-ранний акчагыл ($N_2km_3-ak_1$), 2 – ранний и средний акчагыл ($N_2ak_{1,2}$), 3 – поздний акчагыл (N_2ak_3) [20].

Разломы

Разновозрастные глубинные разломы в пределах Ростовского выступа маркируют деформации сжатия и расширения (Рис. 5). Для архейских разрывных нарушений характерно диагональное простирание. Протерозойские разломы ориентированы в субширотном и меридиональном направлениях. Часть из них сохранили активность до плиоцена. Большинство палеозойских разломов имеют направление структур Донецкой складчатости. Ближайшими к территории Ростова-на-Дону являются разломы: Передовой (5-10 км севернее), Манычский, Таганрогский (пересекает северную часть города), Персиановский (30 км севернее). Часть разломов визуализируются в руслах рек и рельефе. Передовой разлом, пересекающий устье р. Аксай проявляет себя в повышенной активности овражно-балочной системы восточной окраины города Ростова-на-Дону. Из-за деформаций поверхности земли разрушились здания жилого квартала у правого борта балки Прохоровской.

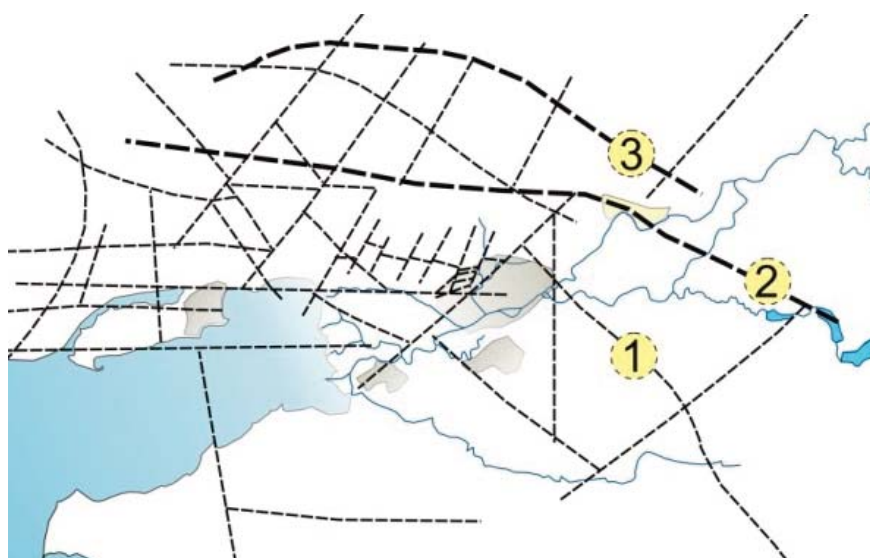


Рис. 5. Разрывные нарушения домелового возраста в ближайшем окружении территории г. Ростова-на-Дону[18]; крупные разломы: 1 – Передовой, 2- Маньчский, 3 – Персиановский; серым цветом показаны населенные пункты.

Современные тектонические движения

Карты современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы [7] иллюстрируют их дифференцированность в пределах Ростовского свода (Рис. 4). Западно-Маньчский прогиб в долине Дона является границей, относительно которой в пределах Новочеркасского и Ростовского поднятий, интенсивность восходящих движений в 2-3 раза меньше, чем к югу, в пределах Батайского и Канеловского поднятий. В долине Дона, выделена зона восходящих движений с интенсивностью ~3 мм/год. Побережье Таганрогского залива испытывает малоамплитудное погружение. При этом осью относительной стабильности является западная граница дельты Дона. Карты четвертичных напряжений земной коры [8] отображает неоднородность процессов сжатия-растяжения в ближайшем окружении территории Ростова-на-Дону. Относительной областью покоя является более жесткая структура Ростовского свода. Однако окружающие его геодинамические процессы в радиусе нескольких десятков километров, порождают малоамплитудные пликативные нарушения в залегании пластов осадочных горных пород.

Геолого-геофизические исследования и тектонофизическое моделирование [6] показывают, что в рассматриваемой области преобладают меридиональные направления сжатия и широтные – растяжения. К Батайскому новейшему поднятию тяготеет высокая плотность линейментов, указывающая на рост новейших поднятий. Образующиеся дислокации следуют рисунку крупных положительных композиций фундамента, при этом впадины фундамента имеют тенденцию сокращения в размерах, а поднятия имеют тенденцию к разрастанию. Таким образом, территория г. Ростова-на-Дону вовлечена в общий ход деформаций сжатия в северном направлении и растяжения в широтном, а новейшие деформации поверхности следуют общей региональной закономерности.

Прямые измерения вертикальных перемещений земной поверхности выполнены автором с применением метода спутниковой многопроходной радиолокационной интерферометрической съемки [19]. Многократное зондирование с космической орбиты одной и той же территории позволяет рассчитать серию вертикальных смещений участков поверхности земли с миллиметровой точностью на протяжении нескольких лет. Для мониторинга территории г. Ростова-на-Дону использованы материалы радиолокационной съемки группировки радарных спутников COSMO-SkyMed-1-4 за период 30 месяцев. Пространственное разрешение съемки – 3 м, охват съемки – 40x40 км. Обработка снимков выполнена программными продуктами компании EXELIS VIS: ENVI и SARscape Interferometric Stacking. В интерпретации получаемых результатов учитывается, что при радиолокационном зондировании воспринимаются отражения от любых объектов на поверхности земли. В область расчетов попадают здания и сооружения, испытывающие деформации собственных конструкций. Кроме этого, вертикальные смещения объектов на поверхности земли могут

быть вызваны техногенными причинами, например, просадочными деформациями грунтов или осадкой недавно построенных зданий (Рис. 6б, сгущение точек в северо-западном фрагменте изображенного участка). При анализе выделяются групповые смещения отражающих точек на больших площадях, при этом анализируется траектория смещения во времени. Плавное площадное оседание территории связывается, при прочих равных условиях, с природными тектоническими процессами.

В иллюстрации представлены результаты измерений вертикальных движений поверхности земли в центральной части г. Ростова-на-Дону (Рис. 6). По каждой точке наблюдений рассчитаны изменения вертикальных координат (Рис. 6а). По мере оседания поверхности земли точки постепенно заполняют пространство наблюдаемой территории. При этом хорошо просматривается участок устойчивых нисходящих движений со смещениями $-15 \div -20$ мм. Он имеет дугообразную форму, площадь ~ 10 км², выделен по 730 точкам с 30 измерениями во времени вертикальных координат (Рис. 6а). В совокупности это составляет более 21000 замеров. Визуальное обследование показало, что в застройке 1950-1970 гг. степень износа конструкций незначительна, однако здания поражены системными трещинами с небольшим раскрытием. Следует отметить, что вертикальные смещения носят на выделенном участке более сложный характер. Южнее, в правобережье Дона, расположена зона с преобладающими восходящими движениями со смещениями $+15 \div +20$ мм (Рис. 6в). Она имеет ширину (400-500м) и площадь $\sim 7,5$ км². Можно полагать, что узкий правобережный участок Дона испытывает влияние восходящих движений Западно-Манычского прогиба [7].

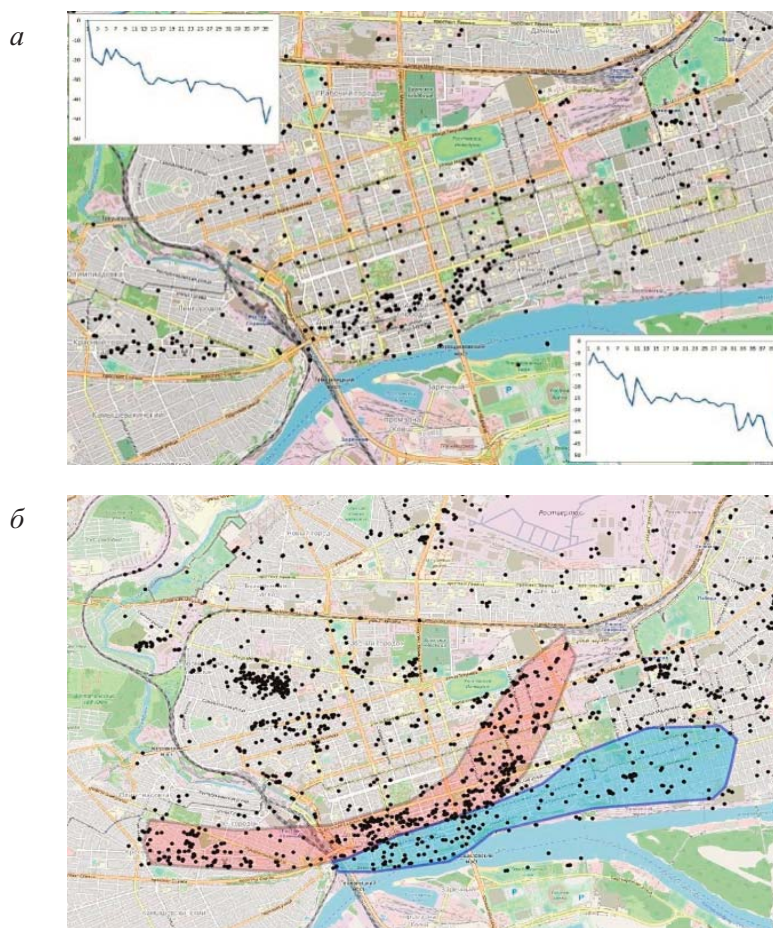


Рис. 6. Осадки поверхности земли в центральной части г. Ростова-на-Дону; период наблюдений: а –12, б –24 месяцев соответственно; графики - распределение осадок во времени в отдельных точках; области опускания (розовый цвет) и подъема (голубой цвет) поверхности земли.

Обсуждение

Наиболее активные движения земной коры проявлялись в докембрии, палеозое и домеловой истории мезозоя. В Ростовском выступе кристаллического фундамента на протяжении докембрийского времени неоднократно формировались пликативные и дизъюнктивные нарушения. Они примыкают к территории города, пересекают ее или расположены на расстоянии первых десятков километров.

Наиболее древние разломы, пересекающие территорию города, сформировались в протерозое (Рис. 2). В истории фанерозойского зона Ростовский выступ сохранял свой статус. Начиная с герцинской эпохи, он играл роль относительно инертного тела, которое оказывалось между интенсивными тектоническими процессами Донецкой складчатой системы и Кавказской области. При их активизации Ростовский выступ откликался образованием дизъюнктивных нарушений (Таганрогский шов в триасе), незначительными подвижками отдельных блоков и формированием малоамплитудных нарушений в более молодых отложениях. В начале миоцена возникли локальные поднятия-ловушки, в которых сформировались месторождения газа. В миоцен-плиоценовый период (поздний понт, киммерий-акчагыл, апшерон, неоплейстоцен) на рассматриваемой территории неоднократно вырабатывалась речная долина, которая меняла свою ширину, мигрировала в вертикальном и меридиональном направлениях. Этот процесс обусловлен слабыми колебательными движениями, в которых образовалась система узких широтных прогибов и поднятий.

Геологические события четвертичной истории описываемого района связаны с планетарными оледенениями, обусловившими колебание уровня морей и статической нагрузки на кристаллический фундамент. В ответ на эти возмущения сформировался современный рельеф. Вертикальное перемещение уровня древней речной долины на территории города достигало 60-70 м. Амплитуда врезов охватывает толщу на глубину сарматского регионаруса среднего миоцена. Прямые измерения интенсивности колебательных движений земной коры подтверждают современную активность этих процессов.

Медленно протекающие деформации поверхности земли на территории города имеют широтное направление и согласуются с общим направлением и динамикой поверхности земли, которые зафиксированы в других исследованиях.

Современные неотектонические движения порождают неблагоприятный фон для рискованных техногенных воздействий, например: застройки оползнеопасных склонов, подтопления территорий, провокации поверхностной эрозии. В последние годы сложилась тенденция застройки многоэтажными зданиями правобережья Дона. Риск освоения территории заключается в высачивании подземных вод, оползневых смещениях делювия на склонах, подпоре подземных вод массивами грунтов, уплотненными свайными фундаментами. Медленные, но устойчивые вертикальные движения в сочетании с техногенными воздействиями способствуют мало предсказуемой деформации фильтрационных потоков подземных вод, изменению физико-механических свойств грунтов, неравномерным осадкам зданий и сооружений. В долине р. Темерник и ряде балок проявляется активная эрозия, оползневые деформации из-за пересечения этих форм рельефа с зонами дизъюнктивных нарушений. Новейшие тектонические движения мало исследованы на территории города. С ними связаны отсроченные негативные последствия в изменении геологической среды. Поэтому необходимо выполнение работ по локализации зон риска, обусловленных современными смещениями поверхности земли. При проектировании защитных инженерных сооружений важно учитывать широкий контекст изменений в геологической среде, включая медленные развивающиеся деформации осадочных отложений.

Литература

1. Атлас литолого-палеогеографических карт Русской платформы и ее геосинклинального обрамления [Карты] / гл. ред. А. П. Виноградов. – Москва, Ленинград, 1960-1961. - 1 атл. (2 ч.) : цв., карты. – 104 с.
2. Бобух В.А., Чихирин А.А. Перспективы газоносности пород кристаллического фундамента в юго-западной части Ростовской области// Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2002. N12, с.29-34.
3. Грановский А. Г. Магматизм и этапы тектонической эволюции Донецкого складчатого сооружения Восточного Донбасса// Геотектоника. 2018. N 4, с. 96-110.
4. Деев Ю.Ф., Мовшиович Е.В, Хакими Л.М., Шумова С.М. Отчет: Подготовка к изданию геологической карты Ростовской области масштаба 1: 5000000, совмещенной с картой полезных ископаемых. Ростовская ГРЭ ГПП «Южгеология», Ростовская ГРЭ, Ростовская область, листы L-37, L-38, M-37, M-38, №16944. 1998. 226 с.
5. Зайцев А.В., Грановский А.Г., Рышков М.М., Зеленищев Г.В. Тектоническое районирование и структурно-формационные комплексы докембрия Ростовской области (Объяснительная записка к тектонической карте докембрия Ростовской области, масштаба 1:1000000)/ Проблемы геологии докембрия юга России. Новочеркасск. 2003, 38-46 с.

6. Зайцев В.А., Панина Л.В. Неотектоника и геодинамика Скифской плиты// Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2011. № 1, с. 3-7.
7. Карта современных вертикальных движений земной коры на территории СССР по геодезическим данным в М 1:500000 М.: ГУГК СССР. 1986.
8. Копп М.Л., Вержбицкий В.Е., Колесниченко А.А. и др. Кайнозойские напряжения востока Русской плиты, Южного и Среднего Урала: Методические, теоретические и прикладные аспекты. Труды ГИН РАН Вып. 610. М.: ГЕОС. 2014. 88 с. Приложение 2.
9. Лебедев Г.И. и др. Отчет по теме: «Анализ результатов геофизических и геохимических исследований по изучению глубинного строения Скифской плиты», СК НЦВШ, Ростов-на-Дону-Ессентуки, №28148, 1999.– 126 с.
10. Мовшович Е.В., Вальбе С.П., Дериглазова Е.Д., Токаева В.Г. и др. Отчет по теме: «Литолого-фациальные и структурные особенности палеозоя различных геоструктурных зон Ростовской области и сопредельных территорий в связи с перспективами нефтегазоносности». Ростов н/Д: ФГУ «ТФИпо ЮФО», 1976. – 268 с.
11. Мовшович Е.В., Грановский А.Г., Макаров В.И., и др. Отчет по теме: «Составление комплекта тектонических карт Ростовской области масштаба 1:500 000. Отчет за 2000-2003 гг.», Ростов н/Д: ФГУ «ТФИпо ЮФО», 2003.– 302 с, № 17221.
12. Национальный атлас России. Том 2. Природа и экология. 2007. Геологическое строение и ресурсы недр. Современные вертикальные движения земной коры. Масштаб 1:15000000. Отв. ред. Г.Ф. Кравченко/ М.: ПКО «Картография», 2007, 206 с.
13. Попов Г.И. Плейстоцен черноморско-Каспийских проливов. М.: Наука, 1983. –216с.
14. Потапов И.И., Погребнов Р.И. О тектоническом районировании территории Дона и Нижней Волги// Геология и полезные ископаемые бассейна Дона и Нижней Волги. Ростов н/Д:Изд-во Рост. Ун-та, 1962, с.23-34.
15. Рубан Д.А. Новые данные об отложениях мезотического обрывистого побережья Танаисского палеозалива Восточного Паратетиса //Геология морей и океанов: Материалы XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, т. I. М.: ГЕОС, 2011, с. 237-241.
16. Хаин В.Е., Попков В.И., Юдин В.В. Палеогеодинамика южного обрамления восточно-европейского кратона // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология. 2010. № 2, с. 3-9.
17. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Научный мир, 2001. 606 с.
18. Экнадиосянц Э.К., Афанасьев Г.В., Зайцев А. Отчет по теме: «Составление комплекса геологических карт Ростовской области масштаба 1:500000, Ростов-на-Дону». ЮТГФ, ГПП Южгеология, РГЭ. 1991.105с., № 459609.
19. Ferretti A., Prati C. and Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry, IEEE Trans// Geosci. Remote Sens. 2001.Vol.39, N 1, pp.8-20.
20. Экнадиосянц Э.К., Афанасьев Г.В., Зайцев А.В. Отчет по теме: «Составление карт масштаба 1:500000 аллювиальных и аллювиально-морских врезов стратиграфических подразделений неогена Ростовской области с целью прогноза связанных с ними полезных ископаемых, Ростов-на-Дону». ЮТГФ, Ростовская ГРЭ ГПП Южгеология, РГЭ, 1994. –104 с. № 467443.

ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ КОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ОБСТАНОВКАХ РАЗВИТИЯ КАРБОНАТНО-СУЛЬФАТНОГО КАРСТА

Е.В. Дробинина

Лаборатория прогнозного моделирования в геосистемах геологического факультета ПГНИУ,
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

ООО «ПКИБЗ», 127018, г. Москва, ул. Сущёвский Вал, д. 5, стр. 3.

Email: alenadrobina@yandex.ru

Освоение территорий, в геологическом строении которых принимают участие карбонатно-сульфатные породы, сопряжено с высокими рисками различного плана, избежать которые возможно только посредством проведения адекватной оценки карстовой опасности. Такая оценка должна включать не только анализ пространственного распределения проявлений процесса растворения, но и выявлять закономерности функционирования карстового массива как геологической системы, которые в дальнейшем могут быть использованы для построения прогнозных схем.

Системный подход к проблеме комплексного изучения карстового массива подразумевает рассмотрение исследуемого объекта как динамичной системы, предполагая тем самым анализ взаимодействия и взаимовлияния его структурных элементов. Системный подход здесь заключается в комплексном исследовании его элементов на различных иерархических уровнях. Характеристика карстового массива, как любой сложной системы, считается полной, если установлен набор ее элементов с их параметрами, структурой и поведением [3].

Карстующиеся породы – это структурный элемент карстового массива, в пределах которого развивается процесс растворения, сопровождающийся формированием полостного пространства – вторичных пор, каверн, расширенных растворением трещин, полостей. Скорость процесса растворения, и, следовательно, морфометрия подземных карстопроявлений зависят от литологического типа карстующихся пород: если карстовый процесс в карбонатных породах может считаться «неразвивающимся» в масштабах времени, соизмеримого со сроком службы большинства инженерных сооружений [7] вследствие относительно низкой растворимости пород, то в условиях сульфатного карста, при скорости растворения в несколько, иногда и десятки, раз превышающей растворение карбонатов, возможно формирование весьма крупных карстовых полостей.

Кроме того, различный характер растворения проявляется и в пределах одного литологического типа пород. Например, в карбонатах, в частности в толще известняков, преимущественно в их прикровельной части, возможно формирование относительно крупных полостей и, как следствие, их выход на поверхность в виде провалов и оседаний дневной поверхности в то время, как в доломитах формируются, главным образом, зоны повышенной кавернозности и прослой доломитовой муки, которая кольматирует естественные пути фильтрации поверхностных и подземных вод через массив, замедляя или вовсе приостанавливая карстовый процесс. При смешанном строении карстующейся толщи, представленном переслаиванием известняков и доломитов, активность развития карста может быть неоднократно повышена.

В рамках данного исследования предлагается оценить особенности свойств коренных отложений в обстановках развития карбонатно-сульфатного карста. Изучаемая территория находится в Добрянском районе Пермского края. Участок расположен в 5 км севернее Мыса Стрелка – слияния рек Чусовой и Камы. Район работ находится в пределах Верхнекамской депрессии, наследующей структуру одноименной впадины и окаймляющей субмеридиональный отрезок долины р. Камы. Рельеф участка, сильно расчлененный долинами рек-притоков р. Камы, что благоприятствует интенсивной инфильтрации атмосферных осадков вглубь массива.

Изучаемая территория расположена в пределах северо-восточной части Краснокамско-Полазненского вала северо-восточного простирания общей длиной около 100 км. Изыскиваемый участок находится на юге Полазненского поднятия – одной из структурных форм вала, характеризующихся наибольшей неотектонической активностью.

В геологическом строении района работ в приповерхностной части принимают участие породы пермской и четвертичной систем. Сводный геологический разрез изучаемого участка представлен на Рис. 1.

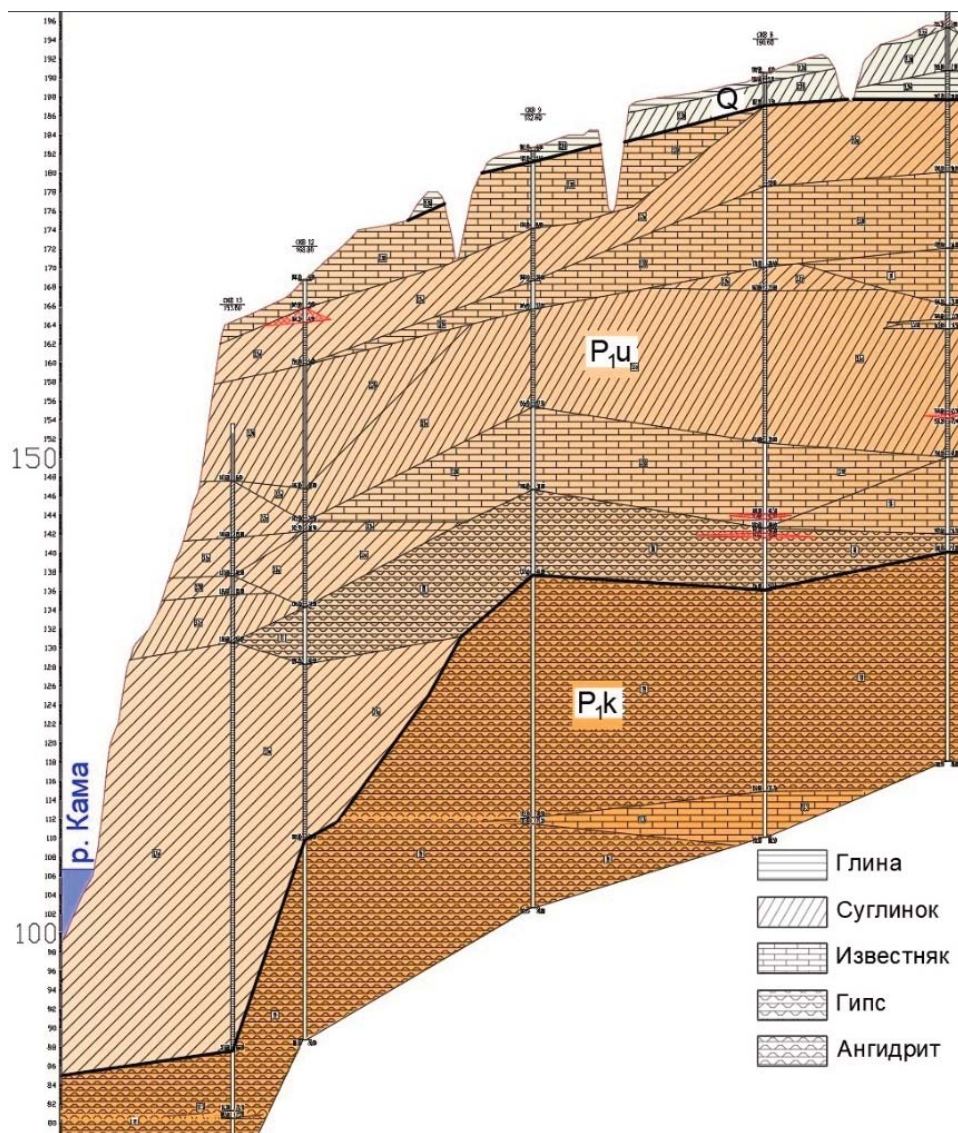


Рис. 1. Сводный разрез изучаемого участка.

Четвертичные отложения представлены на высоких склонах элювиально-делювиальным генетическим типом, водораздельные пространства с поверхности сложены лессоидами: бурыми и серо-коричневыми макропористыми известковистыми суглинками, супесями, реже глинами, с редкими включениями гальки. Элювиально-делювиальные отложения покрывают поверхности междуречий и склоны в верхних частях бортов речных долин. Представлены песчаными глинами, щебнистыми супесями и суглинками с линзами и гнездами песков, иногда гравийных грунтов.

В состав соликамского горизонта уфимского яруса (P_{1u}) нижней перми входят плитчатые мергели, известняки, доломиты, песчаники, алевролиты и аргиллиты. Встречаются включения и линзы гипса и ангидрита. Иренский горизонт кунгурского яруса (P_{1k}) нижней перми распространен повсеместно на изыскиваемой территории, на большей части подстилает уфимские отложения. На крутом абразионном склоне р. Камы (Чусовская Стрелка, Чусовской Мыс) встречаются обнажения пород горизонта. Иренский горизонт представлен чередованием гипсово-ангидритовых и карбонатных литологических пачек, в составе последних выделяются преимущественно доломиты с прослоями мергелей, аргиллитов и известняков.

В районе работ, исходя из геологических данных, можно выделить водоносные горизонты и комплексы в четвертичных, соликамских и иренских отложениях. На изучаемом участке подземные

воды развиты неравномерно в элювиально-делювиальных отложениях. Водоносный комплекс в соликамских отложениях распространен трещиноватых известняках, доломитах, мергелях, песчаниках. Водоупором для комплекса служат иренские сульфатные породы или нетрещиноватые разности перечисленных выше пород и глин соликамского горизонта. Водоносный комплекс в иренских отложениях распространен на междуречье рек Камы и Чусовой, сложен чередующимися гипсово-ангидритовыми и известняково-доломитовыми пачками, водоносными только на участках их выхода на поверхность. С погружением под более молодые породы иренские отложения становятся водоупором. Отложения ниже эрозионного вреза в целом безводны и, водонепроницаемы; трещины способные в природных условиях фильтровать воду отсутствуют.

Участок находится в пределах западной части Полазненского (Полазнинско-Шалашинского) карстового района, характеризующегося карбонатно-сульфатным и сульфатным типами карста в гипсах и перекрывающих их плитчатых трещиноватых известняках и доломитах, степенью трещиноватости и составом которых определяются морфология и плотность карстовых форм на участке. В целом трещиноватость, пористость и кавернозность пород создают единую гидравлическую систему, обеспечивающую движение воды в изучаемом карстовом массиве [4].

Большая часть поверхностных карстопроявлений является древними, их диаметры изменяются от 9 до 20 м при глубине до 6 м. При слиянии нескольких воронок образуются котловины диаметром 100 м и более, вытянутые параллельно логам [1, 2]. Примечательно, что в районах гипсового карста в Пермском крае преобладают провальные воронки, диаметр которых обычно в два раза больший, чем в районах развития карбонатного карста [5].

У бровок склонов расположены наиболее глубокие, иногда сложные, воронки и котловины. Вниз по склону поперечник, глубина и плотность воронок уменьшается. Это явление объясняется тем, что в коренных склонах долин и оврагов увеличивается трещиноватость, главным образом за счет развития трещин бортового отпора. Кроме того, в верхних частях склонов отмечается небольшая мощность и более грубый состав покровных отложений, что при наличии трещин бортового отпора усиливает фильтрацию воды. На ровной поверхности водораздела, где мощность покровных отложений увеличивается, плотность карстовых форм понижается и изменяется их форма. В условиях равнинного рельефа смыв глинистого материала направлен в замкнутые карстовые понижения, поэтому здесь 85,6% приходится на карстовые блюдца, озера и болота [1].

Для описанного участка проводилась оценка изменения содержания известняков, гипсов и ангидритов в толще скальных грунтов по мере удаления от поверхностных карстовых форм. Содержание карбонатов и сульфатов в грунтах определена путем химического анализа солянокислой вытяжки из грунтов. Удаленность от карстовых воронок определена как расстояние от центра воронки по прямой в метрах (Рис. 2).

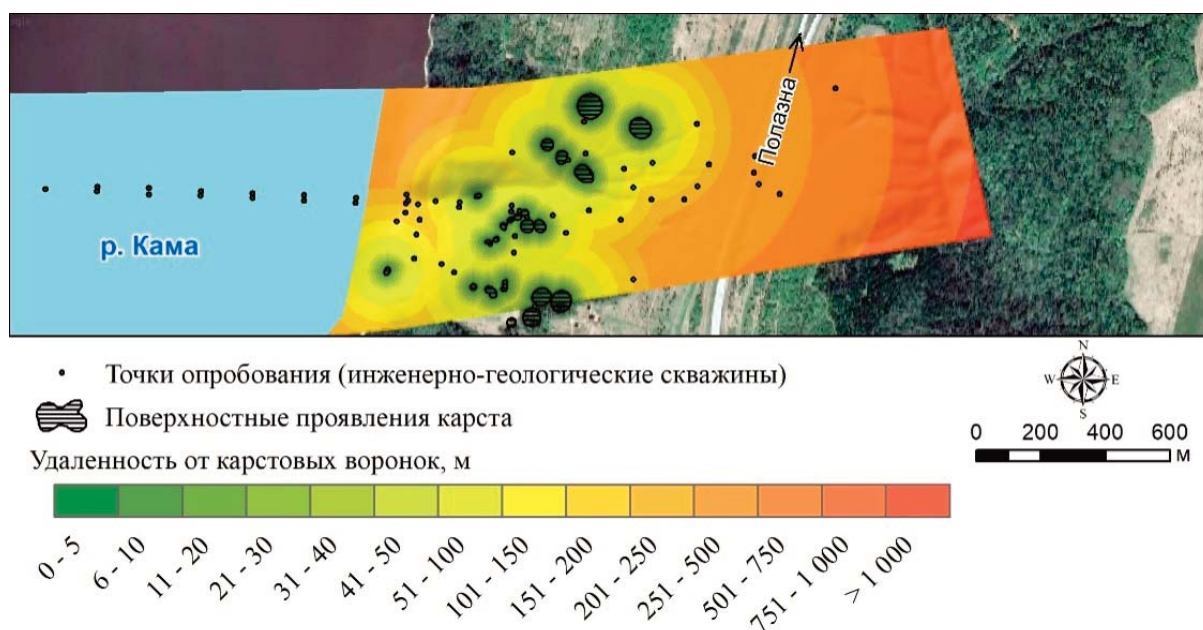


Рис. 2. Карта удаленности от карстовых воронок.

Изменчивость содержания различных растворимых минералов в толще карстующихся отложений оценивалась путем прямого сопоставления посредством построения двумерных облаков точек, характеризующих отношение содержания компонента в пробе и расстояния от этой пробы до ближайшей карстовой воронки по прямой. Все используемые числовые значения переменных приведены к единой шкале для совместного аналитического и графического анализа посредством нормализации по данной формуле:

$$x_{ind} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad (1)$$

где x_{ind} – нормированное значение параметра, диапазон изменения которого 0-1, x_i – реальное значение параметра, x_{min} – минимальное значение параметра в выборке, x_{max} – максимальное значение параметра в выборке.

Диапазоны значений исследуемых параметров: содержание карбонатов 0-30% (в гипсовой толще), 0-50% (в ангидритовой толще), сульфатов 0-50% (в известняковой толще). Максимальное расстояния от исследуемой пробы до карстовой формы – 215 м.

В результате прямого сопоставления значений содержания компонентов в толщах растворимых пород получены графики, отражающие характер изменчивости содержания карбонатов и сульфатов по мере удаления от проявлений карста по прямой в горизонтальном направлении. Так, на участках проявления карстового процесса на поверхности и близких к ним отмечается повышенное содержание примесей сульфатов в известняках; содержание карбонатных примесей в гипсах и ангидритах, наоборот, сокращается (Рис. 3).

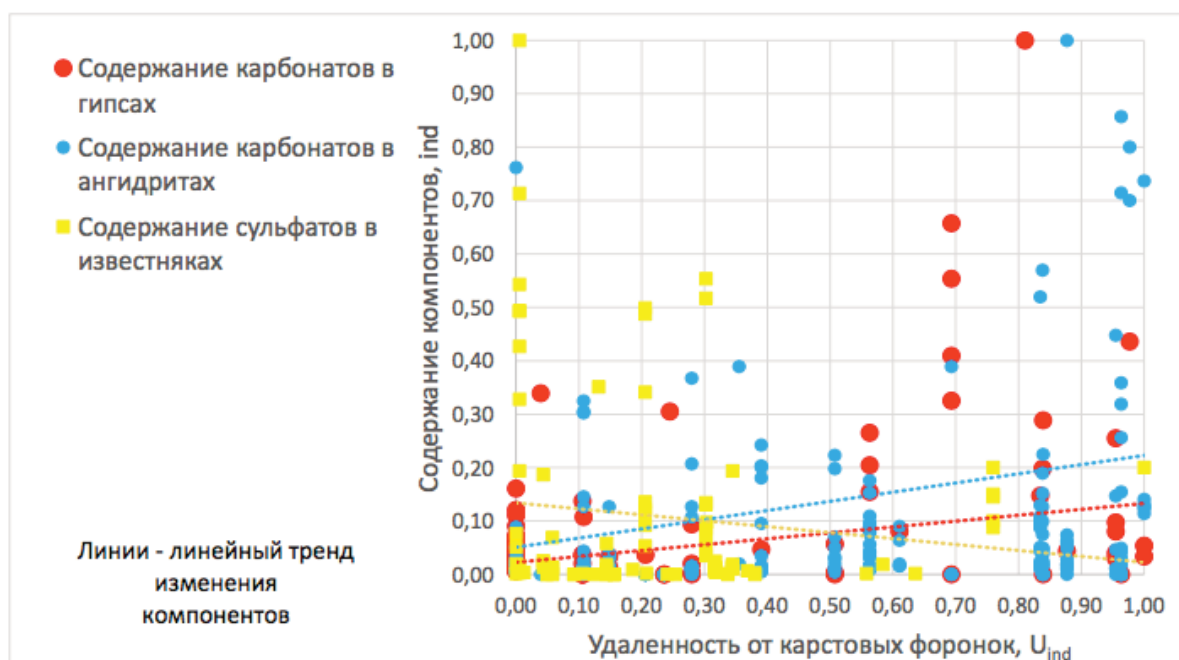


Рис. 3. График изменения содержания карбонатов и сульфатов в растворимых породах по мере удаления от карстовых форм.

Поверхностные проявления карстового процесса на изучаемой территории тяготеют к участкам повышенного содержания сульфатов, скорость растворения которых может быть выше в несколько раз. Кроме того, в обстановках карбонатно-сульфатного карста крупные полости, способные инициировать провалообразование, часто формируются на контакте сульфатных пород и перекрывающих их карбонатных вследствие восстановления агрессивности воды по отношению к сульфатам посредством раздоломичивания при фильтрации через перекрывающие карбонатные породы воды, насыщенной сульфатом кальция [6].

Также в рамках исследования скальных грунтов на участке проанализировано изменение по мере удаления от поверхностных проявлений карста коэффициента размягчаемости – величины, характеризующей способность скальных и полускальных грунтов снижать свою прочность после водона-

сыщения. И для карбонатных и для сульфатных пород отмечается рост этого коэффициента по мере удаления от карстовых форм, причем для последних это прослеживается наиболее очевидно (Рис. 4). Иными словами, прочность растворимых пород в непосредственной близости к карстовым формам при водонасыщении снижается относительно меньше таковой здесь в естественных условиях. Это скорее всего объясняется тем, что в непосредственной близости к карстовым формам грунты в естественном залегании уже характеризуются относительно повышенным водонасыщением вследствие хорошей инфильтрации пресных вод через дно карстовых воронок. Так, над выветрелыми зонами в карстующихся породах за счет развития трещин и, как следствие, хорошей проницаемости массива, влага в верхних горизонтах не задерживается: просачивается вглубь массива [8].

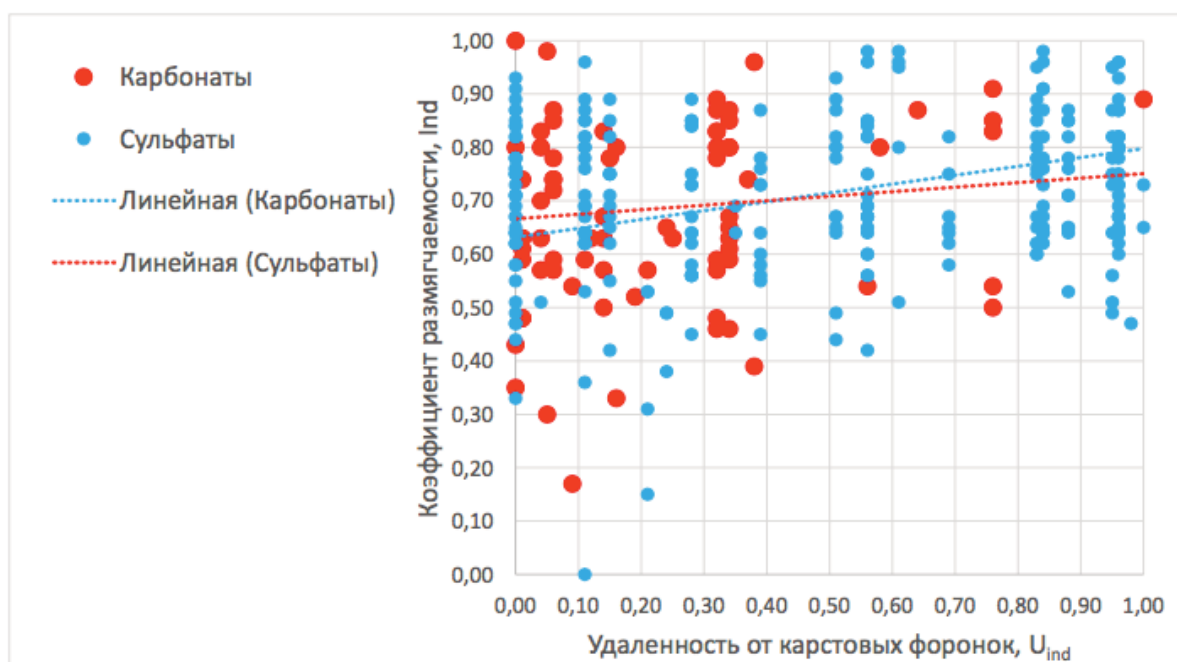


Рис. 4. График изменения значений коэффициента размягчаемости карбонатов и сульфатов по мере удаления от карстовых форм.

Выявленные закономерности могут быть использованы при проведении качественной оценки карстовой опасности. Относительно повышенное содержание сульфатов по результатам химического анализа солянокислых вытяжек, относительно пониженные значения коэффициента размягчаемости могут быть основанием для выделения потенциально опасной категории карстовой опасности.

Выводы

1. В пределах изучаемой территории участки, характеризующиеся широким развитием поверхностных проявлений карстового процесса, характеризуются повышенным содержанием сульфатов.
2. Снижение прочностных свойств растворимых пород при водонасыщении заметнее проявляется по мере удаления от карстовых воронок.
3. Поиск закономерностей в изменении свойств различных элементов карстового массива, в частности растворимых грунтов, согласно идее системного подхода к изучению карстовых массивов, может оказаться весьма эффективным при проведении оценки карстовой опасности.

Литература

1. Бутырина К.Г. Гипсовый карст центральной части Пермской области. Дисс. канд. географ. наук / Перм. ун-т. Пермь, 1968, 380 с.
2. Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г. Карст и пещеры Пермской области. Пермь: Перм. гос. ун-т, 1992, 200 с.
3. Катаев В.Н. Основы структурного карстования. Пермь, 2004, 143 с.

4. 4. Килин Ю.А., Минькевич И.И. Карст Чусовского Мыса Камского водохранилища // *Инновационный потенциал естественных наук. Том II. Экология и рациональное природопользование. Управление инновационной деятельностью.* Пермь, 2006, с. 91–94.
5. Максимович Г.А. Карст гипсов и ангидритов земного шара (Геотектоническая приуроченность, распространение и основные особенности) // *Общие вопросы карстоведения.* М., 1962. С.108-113.
6. Печеркин А.И. Геодинамика сульфатного карста. Иркутск, 1986, 172 с.
7. Толмачев В.В., Ройтер Ф. Инженерное карстоведение. М.: Недра, 1990, 151 с.
8. Chen, X., Zhang, Z., Chen, X. et al. The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China // *Environ Earth Sci* 59, 811–820 (2009). <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0077-6>

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА И СТРОЕНИЯ ЮРСКИХ ГЛИН В ЗОНЕ ОПОЛЗНЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ НА УЧАСТКЕ «ВОРОБЬЕВЫ ГОРЫ» (г. МОСКВА)

О.В. Зеркаль¹, Е.Н. Самарин¹, М.С. Чернов¹, И.В. Аверин², П.В. Новиков¹

¹ Геологический факультет, Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1 E-mail: igzov@mail.ru

² ООО «Инженерная геология», 121552, Москва, ул. Ярцевская, д. 16

Правобережный склон р.Москвы в районе Воробьевых гор (г. Москва) характеризуется широким развитием оползневых процессов, которые изучаются с конца XIX в. [8]. По результатам изучения склоновых деформаций на рассматриваемой территории, выполненных в 1930-1960х гг. Б.М.Даньшиным, Н.А.Корчебоковым, М.В.Чуриновым, В.В.Кюнтцелем, сформировались представления о том, что основная зона оползневых смещений на Воробьевых горах приурочена к глинам оксфордского яруса [1, 3, 6, 10]. Н.А.Корчебоков, анализируя изменения глубины и мощности залегания оксфордских глин в пределах оползневого склона, предположил, что основным механизмом оползневых смещений на участке Воробьевых гор является выдавливание, а «выдавленная оползнем толща оксфорда имеет мощность около 10 м» (с. 384, [3]). В настоящее время, большинство специалистов (О.С.Барыкина, А.И.Казеев, М.П.Кропоткин, Ю.А.Мамаев, Г.В.Николаева, А.В.Тихонов, И.К.Фоменко, а также авторы настоящей статьи), изучавшие оползни на рассматриваемой территории в последние годы, разделяют представления о существенной роли юрских глин в устойчивости высоких склонов долины р.Москвы. Вместе с тем, представления о выдавливании как основном механизме развития на Воробьевых горах в настоящее время активно критикуются [4, 5]. В ряде работ основным механизмом оползневых смещений на участке Воробьевых гор, в настоящее время, рассматривается блоковое скольжение [2, 7, 12, 13]. Основной целью представляемой работы является рассмотрение изменения состава и строения юрских глин в зоне оползневых смещений на Воробьевых горах.

Особенности геологического строения в районе Воробьевых гор. Верхняя часть геологического разреза, вовлеченная в оползневые смещения на рассматриваемой территории, включает четвертичные, меловые и юрские образования. В ненарушенной части склонового массива кровля верхнеюрских глинистых отложений располагается на глубинах от 65 м до 75-80 м, а в пределах Лужнецкой излучины – на глубинах 10-12 м, залегая непосредственно под аллювиальными образованиями.

Толща юрских образований, имеющая общую мощность 30-32 м, сложена отложениями мневниковской свиты (филёвская и егорьевская подсвиты) титонского яруса, макарьевской свиты оксфорд-кимериджского возраста, коломенской и подмосковной свит оксфордского яруса, чулковской свиты келловей-оксфордского возраста, криушской свиты келловейского яруса и, на отдельных участках, батской москворецкой толщи [9]. Обобщенные результаты стратиграфического изучения мезозойских отложений в районе Воробьевых гор, проведенного А.А. Школиным и С.Ю. Маленкиной по керну скважин, пройденных ГУП «Мосгоргеотрест», опубликованы в [11].

Юрские образования преимущественно представлены глинами, за исключением егорьевской подсвиты и, частично, криушской свиты. Как видно из приведенного описания, разрез отложений юрского возраста имеет довольно сложное строение, что определяется изменчивостью условий осадконакопления и достаточно длительными периодами господства континентальных условий. В связи с этим, подход к анализу влияния юрских отложений на устойчивость склонов в районе Воробьевых гор (как и на других участках развития глубоких оползней в г. Москве) с достаточно «грубым» делением глин по ярусам, более характерным для работ середины прошлого столетия, но по-прежнему встречающийся в публикуемых результатах исследований, сложно рассматривать как обоснованный. Глины различных свит существенно различаются как по минеральному, так и гранулометрическому составу, что предопределяет изменчивость их физико-механических свойств и различную роль в развитии оползневых процессов.

Состав глинистых отложений на участке Воробьевых гор и их изменчивость в зоне оползневых деформаций. Первой (сверху) выдержанной толщей глин в составе разреза юрских отложений

являются образования филёвской подсвиты, залегающие в верхней части мневниковской свиты. Мощность отложений филёвской подсвиты в ненарушенной части склонового массива на рассматриваемой территории достигает 5-6 м. Исходя из усредненных значений числа пластичности и содержания песчаных частиц, образования филёвской подсвиты относятся к легким песчанистым глинам.

В минеральном составе глин филёвской подсвиты содержание глинистых минералов достигает 33-35% с преобладанием смектита и гидрослюд. В зонах оползневого перемятия доля глинистых минералов в этих отложениях несколько возрастает, превышая 40%. Суммарное содержание кварца, КПШ и плагиоклазов в филёвских глинах достигает 46-52%, снижаясь в зонах оползневого перемятия более чем на 25% от первоначальных величин. Содержание карбонатов (кальцит, доломит и др.) составляет до 7-8%, несколько возрастая в зоне оползневого перемятия. Доля гипса в составе филёвских глин также достигает 7-8%. В отличие от карбонатов, содержание гипса в зоне оползневого перемятия не возрастает, а существенно снижается.

Отложения филёвской подсвиты в ненарушенной части склонового массива подстилаются песчано-супесчаными образованиями нижней части мневниковской свиты, с перерывом налегающими на толщу глин, накопление которых происходило в рамках единого седиментационного цикла, начиная со среднего келловея, продолжалось в течение всего оксфорда и завершилось в раннем кимеридже. Суммарная мощность этой толщи глин составляет более 20 м.

Непосредственно под образованиями мневниковской свиты в ненарушенной части склонового массива залегают глины макарьевской свиты. Ненарушенная мощность отложений макарьевской свиты на рассматриваемой территории составляет 5-6 м. Исходя из усредненных значений числа пластичности и содержания песчаных частиц, отложения макарьевской свиты относятся к тяжелым глинам.

Для минерального состава глин макарьевской свиты характерно преобладание глинистых минералов, доля которых составляет (в среднем) 65%. Среди глинистых минералов до 85-90% принадлежит смектиту. Вместе с тем, в пределах многочисленных плоскостей смещения (в виде зеркал скольжения), выявленных в толще глин макарьевской свиты, доля глинистых минералов снижается практически вдвое. При этом в составе глинистых минералов существенно возрастает роль смешанослойных минералов (иллит-смектитового ряда с неупорядоченной структурой) и хлорита. Суммарное содержание кварца, КПШ и плагиоклазов в макарьевских глинах составляет в среднем порядка 14-15%, существенно возрастая в пределах плоскостей смещения. Близкими величинами в минеральном составе глин макарьевской свиты характеризуется содержание карбонатов (14-15%), существенно не изменяющееся в пределах плоскостей смещения. Доля гипса в составе макарьевских глин незначительна. Вместе с тем, в отличие от филёвских глин, в составе отложений макарьевской свиты заметным является содержание пирита (до 5-6%), доля которого в пределах плоскостей смещения существенно возрастает.

Вниз по разрезу образования макарьевской свиты переходят в отложения коломенской свиты, имеющие мощность в ненарушенной части склонового массива до 7,5-8,0 м. Исходя из усредненных значений числа пластичности и содержания песчаных частиц, отложения коломенской свиты относятся к тяжелым глинам.

В минеральном составе глин коломенской свиты глинистые минералы составляют до 16-17% с преобладанием смектита и гидрослюд. Содержание кварца в коломенских глинах составляет порядка 22% при практически полном отсутствии КПШ и плагиоклазов. Вместе с тем, в отличие от филёвских и макарьевских глин, в минеральном составе глин коломенской свиты значительную роль играют цеолиты, доля которых может достигать 37-39%. Также в минеральном составе глин коломенской свиты существенна доля карбонатов, общее содержание которых достигает 25% и более, позволяя характеризовать коломенские глины как известковистые.

Образования коломенской свиты подстилаются отложениями подмосковной свиты. Ненарушенная мощность глин подмосковной свиты на рассматриваемой территории достигает 7 м. Исходя из усредненных значений числа пластичности и содержания песчаных частиц, отложения подмосковной свиты относятся к тяжелым глинам.

В минеральном составе глин подмосковной свиты глинистые минералы составляют (в среднем) до 27% с преобладанием смектита и гидрослюд при существенной роли каолинита. В пределах плоскостей смещения (в виде зеркал скольжения), выявленных в толще глин подмосковной свиты, доля глинистых минералов понижается на ~20%. Суммарное содержание кварца и плагиоклазов в подмосковных глинах составляет порядка 21-22%, оставаясь практически неизменным в пределах



Рис. 1. Вид зеркала скольжения в глинах макарьевской свиты.

плоскостей смещения. Также, как и в коломенских глинах, в минеральном составе глин подмосковной свиты существенна доля карбонатов, общее содержание которых составляет 32% и более, позволяя характеризовать подмосковные глины как известковистые. В пределах плоскостей смещения доля карбонатов остается практически неизменной. Заметным в составе отложений подмосковной свиты является содержание пирита (до 15% и более), доля которого в пределах плоскостей смещения, также, как и в макарьевских глинах, существенно возрастает.

Ниже по разрезу, под образованиями подмосковной свиты, залегают глины чулковской свиты, ненарушенная мощность которых на рассматриваемой территории составляет 3-4 м. Исходя из усредненных значений числа пластичности и содержания песчаных частиц, отложения чулковской свиты относятся к тяжелым глинам.

В минеральном составе глин чулковской свиты глинистые минералы составляют (в среднем) 9-10% с преобладанием гидрослюд. Суммарное содержание кварца, КППШ и плагиоклазов в чулковских глинах может достигать 70%. Содержание карбонатов (кальцит, доломит и др.) составляет до 15-16% и более. Заметным в составе отложений чулковской свиты является содержание пирита, которое составляет в среднем порядка 6%.

В основании глинистой толщи келловей-оксфорд-кимериджского седиментационного цикла на рассматриваемой территории залегают отложения криушской свиты, мощность которых на рассматриваемой территории составляет 1 м, реже более. Исходя из усредненных значений числа пластичности и содержания песчаных частиц, отложения криушской свиты относятся к легким пылеватым глинам.

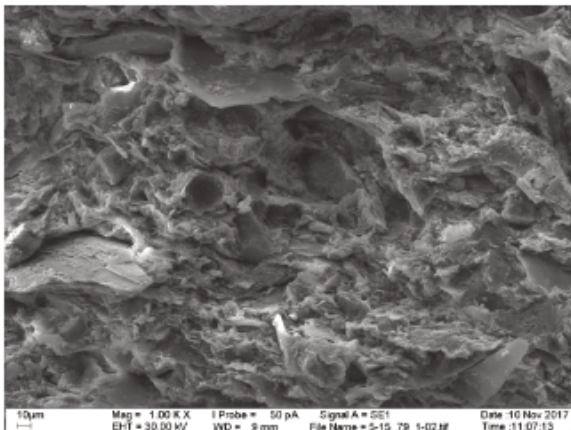
Преобладающими в составе криушских глин являются глинистые минералы, доля которых достигает 67% и более. Среди глинистых минералов до 75% принадлежит смектиту. Суммарное содержание кварца и плагиоклазов в криушских глинах составляет 12% и более, а карбонатов – до 10%. Доля пирита в составе криушской свиты достигает 13%.

Микростроение глинистых отложений на участке «Воробьевы горы» и его изменчивость в зоне оползневых деформаций. Проведенное изучение микростроения глинистых отложений, выполненное для глин макарьевской и подмосковной свит, отобранных как в ненарушенной части склонового массива, так и в зонах развития оползневых деформаций, преимущественно в интервалах зон скольжения, позволило выявить произошедшие изменения в микростроении глин.

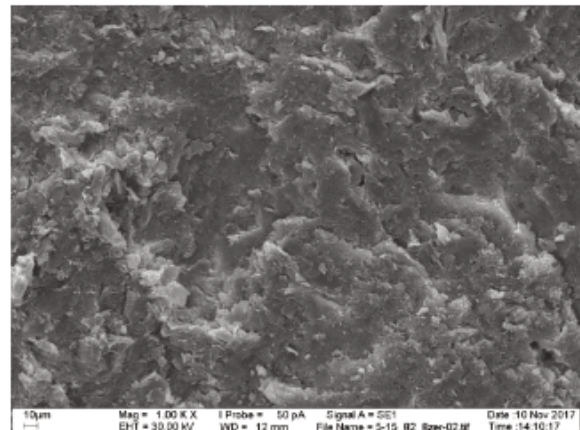
Для глин макарьевской свиты в ненарушенном состоянии характерна матричная микроструктура со слабой ориентированностью формирующих ее структурных элементов (Рис. 3а). Ополз-



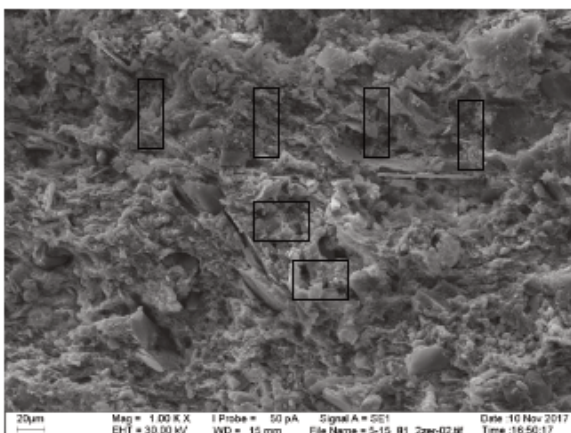
Рис. 2. Вид зеркала скольжения в глинах подмосковной свиты.



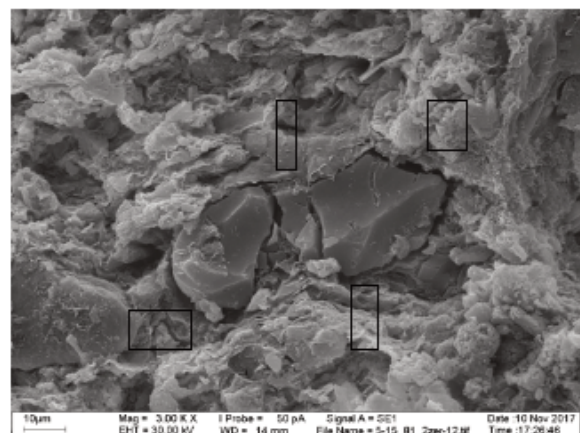
а.х1000



б. х1000



в. х1000



г.х3000

Рис. 3. Микростроение глин макарьевской свиты и его изменение в зоне оползневых деформаций: а - в ненарушенном залегании; б – непосредственно в пределах плоскости смещения (зеркала скольжения), вид перпендикулярно плоскости скольжения; в – в зоне влияния смещения (вне плоскости смещения); г - разрушенный микроагрегат в зоне смещения.

невые деформации оказывают существенное влияние на микростроение макарьевских глин. Непосредственно в пределах плоскостей смещения (зеркал скольжения) (Рис. 3б) в результате переориентации глинистых частиц и микроагрегатов, приобретающих направление параллельно плоскости сдвига, происходит полная перестройка микростроения с образованием высокоориентированной микроструктуры. В результате произошедшей перестройки формируются поверхности, выполняемые тонкими «чешуйками», представляющими из себя глинистые микроагрегаты. Толщина зон с высокоориентированной микроструктурой, образующих «плоскости» скольжения, оценивается в несколько десятков микрон. На описываемых поверхностях при небольших увеличениях могут быть прослежены субпараллельные микроборозды, образование которых, по-видимому, обусловлено последующими механическими перемещениями по зоне скольжения. Вне пределов собственно плоскостей смещения также фиксируются изменения в микростроении по сравнению с микростроением глин в ненарушенном состоянии. В матричной микроструктуре наблюдается появление разноориентированных микротрещин (Рис. 3в), а также механически разрушенных зерен и микроагрегатов (Рис. 3г).

Для глин подмосковной свиты в ненарушенном состоянии характерна беспорядочная матричная микроструктура (Рис. 4а).

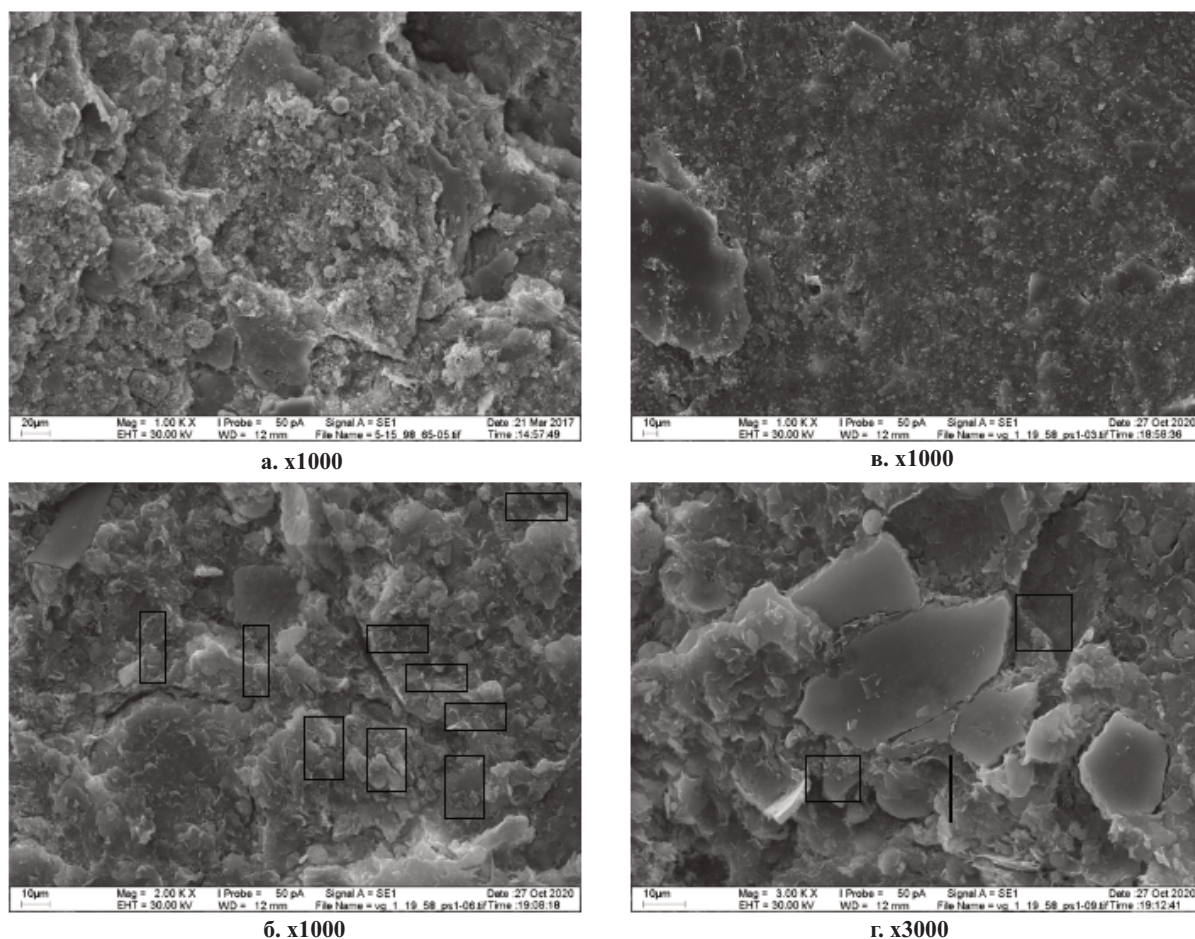


Рис. 4. Микростроение глин подмосковной свиты и его изменение в зоне оползневых деформаций:
а - в ненарушенном залегании; б – непосредственно в пределах плоскости смещения (зеркала скольжения), вид перпендикулярно плоскости скольжения; в – в зоне влияния смещения (вне плоскости смещения); г - разрушенный микроагрегат в зоне смещения.

В микростроении подмосковных глин прослеживаются многочисленные скелеты микроорганизмов, что объясняет высокое содержание карбонатов в минеральном составе этих глин (до 32%), а также сферические скопления пирита, что хорошо согласуется с результатами изучения минерального состава, показавшего значительную долю этого минерала (15% и более).

Выявленные изменения в микростроении глин подмосковной свиты, произошедшие под влиянием оползневых деформации, по общей своей направленности аналогичны таковым, выявленным

для макарьевских глин. Непосредственно в пределах плоскостей смещения (зеркал скольжения), также как и для макарьевских глин, отмечается существенная перестройка микростроения глин подмосковной свиты (Рис. 4б), в результате которой произошло образование высокоориентированной микроструктуры при переориентации глинистых частиц и микроагрегатов, приобретших направление параллельно плоскости сдвига. Толщина зон с высокоориентированной микроструктурой, образующих «плоскости» скольжения, также оценивается в несколько десятков микрон. На описываемых поверхностях также прослеживаются субпараллельные микроборозды, хорошо видны при небольших увеличениях, образование которых, по-видимому, связано с последующими механическими перемещениями по зоне скольжения. Вне зон, формируемых плоскостями смещения, зафиксированные изменения в микростроении глин подмосковной свиты (по сравнению с микростроением глин в ненарушенном состоянии), также подобны описанным изменениям в макарьевских глинах. В общей матричной микроструктуре подмосковных глин отмечается появление разноориентированных микротрещин (Рис. 4в), а также механически разрушенных зерен и микроагрегатов (Рис. 4г).

Заключение

Полученные результаты изучения изменения состава и строения верхнеюрских глин в зоне оползневых смещений на участке «Воробьевы горы» позволяют сделать следующие выводы.

1. Разрез отложений юрского возраста, вовлекаемых в оползневые деформации в районе Воробьевых гор, характеризуется довольно сложным строением. В его составе выделяются мневниковская (филёвская и егорьевская подсвиты), макарьевская, коломенская, подмосковная, чулковская, криушская свиты и, на отдельных участках, московская толща. Юрские образования преимущественно (за исключением егорьевской подсвиты и, частично, криушской свиты) представлены глинами. Их накопление связано с несколькими седиментационными циклами. Образование мневниковской свиты происходило в титонское время. Накопление основной глинистой толщи, мощность которой в ненарушенной части склонового массива составляет свыше 20 м, происходило, начиная со среднего келловоя, продолжалось в течение всего оксфорда и завершилось в раннем кимеридже. В связи с этим, анализ влияния юрских отложений на устойчивость склонов в районе Воробьевых гор (как и на других участках развития глубоких оползней в г. Москве) следует выполнять с учетом особенностей строения разреза юрских отложений, учитывая, что глины различных свит имеют разный состав и, как следствие, характеризуются различными свойствами. Подход, основанный на «грубом» делении глин только по ярусам, следует рассматривать как устаревший, более присущий работам середины прошлого столетия.

2. Выявленные изменения состава юрских глин в зоне оползневых смещений заключаются:

– для глин филёвской свиты (в зоне оползневого перемещения) - в возрастании доли глинистых минералов, снижении доли кварца, КПШ и плагиоклазов, а также гипса, на фоне отсутствия изменений в содержании карбонатов;

– для глин макарьевской и подмосковной свит (в пределах плоскостей смещения (в виде зеркал скольжения)) - в снижении доли глинистых минералов, в отдельных случаях существенном, в некотором возрастании содержания кварца, КПШ и плагиоклазов, в заметном возрастании доли пирита при неизменном, в целом, содержании карбонатов.

3. Выявленные изменения микростроения юрских глин в зоне оползневых смещений, изученные для глин макарьевской и подмосковной свит в пределах плоскостей смещения (в виде зеркал скольжения), позволяют говорить о единстве выявленного механизма перестройки микростроения. Формирование зон скольжения сопровождается образованием (в интервале плоскостей смещения) высокоориентированной микроструктуры в результате переориентации глинистых частиц и микроагрегатов, приобретающих направление параллельное плоскости сдвига. Толщина зон с высокоориентированной микроструктурой, образующих «плоскости» скольжения, оценивается в несколько десятков микрон. Вне зон, формируемых плоскостями смещения, зафиксированные изменения в микростроении глин (по сравнению с микростроением глин в ненарушенном состоянии) заключаются в появлении разноориентированных микротрещин и механически разрушенных зерен и микроагрегатов.

4. Изменения в микростроении юрских глин, произошедшие в зоне оползневых смещений на участке «Воробьевы горы», выявленные для глин макарьевской и подмосковной свит, не являются

подобными изменению микростроения глинистых грунтов, наблюдавшихся при формировании оползней пластического течения, описанных ранее в [14].

Полученные результаты изучения изменения состава и строения юрских глин в зоне оползневых смещений на участке «Воробьевы горы» позволяют более обосновано проводить анализ развития глубоких оползней на рассматриваемой территории. Вместе с тем, важным направлением дальнейших работ является получение сходных материалов и по другим участкам развития глубоких оползней на территории г. Москвы.

Исследования проведены с применением оборудования, приобретенного в рамках реализации Программы развития Московского университета (растровый электронный микроскоп LEO 1450VP (Германия)).

Литература

1. Даньшин Б.М. Геологическое строение Ленинских гор в связи с некоторыми вопросами стратиграфии отложений меловой системы и оползневыми явлениями по берегу р. Москвы//Изв. Моск. геологич. треста. 1937.т. 4, с. 8-22
2. Зеркаль О.В., Барыкина О.С., Фоменко И.К. Проблемы и современное развитие представлений о крупных оползнях г. Москвы (комментарии к статье М.П. Кропоткина, Н.А. Орловой «Крупные оползни Москвы - новые взгляды или новые заблуждения?»)//Инженерная геология. 2020. Т. XV, №4, с. 30-40
3. Корчебоков Н.А., Романов А.В., Яковлев С.Я. Оползни Ленинских гор//Геология в реконструкции г. Москвы. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1938, с. 377-390
4. Кропоткин М.П. Существуют ли оползни выдавливания?//Инженерная геология. 2016. № 2, с. 28-41
5. Кропоткин М.П., Орлова Н.А. Крупные оползни Москвы - новые взгляды или новые заблуждения?//Инженерная геология. 2020. т. XV. №2, с. 20-34
6. Кюнтцель В.В. О возрасте глубоких оползней Москвы и Подмосковья, связанных с юрскими глинистыми отложениями//Бюлл. Моск. об-ва исп. природы. Отд. Геологии. 1965. т. XL, №3, с. 93-100
7. Николаева Г.В. О распространении оползневых отложений в районе Лужнецкой излучины реки Москвы//Геоэкология. 2016. № 6, с. 557-565
8. Павлов А.П. Новые данные по геологии Воробьевых гор//Вестник естествознания. 1890. №7, с. 301-304
9. Унифицированная региональная стратиграфическая схема юрских отложений Восточно-Европейской платформы. Объяснительная записка. М., ПИН РАН-ВНИГНИ, 2012.
10. Чуринов М.В. Характеристика оползней правого берега р. Москвы на участке Ленинскихгор и возможность строительного освоения этой территории//Вопросы гидрогеологии инженерной геологии: Тр. ВСЕГИНГЕО. М., Госгеолтехиздат, 1957. №15, с. 62-78.
11. Школин А.А., Маленкина С.Ю. Воробьевы горы - историческое место московской геологии: новые данные постратиграфии юрско-меловых отложений//Проблемы региональной геологии Северной Евразии: Матер. X науч. чтений, посвящ. памяти проф. М.В. Муратова. - М., 2016. с. 110-112.
12. Barykina O.S., Zerkal O.V., Samarin E.N., Gvozdeva I.P. The History of Slope Evolution - Primary Cause of its Modern Instability (by Example of the «Vorobyovy Gory» Landslide, Moscow)//Natural Hazards and Risk Research in Russia: Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering. Springer, 2019, pp. 345-361.
13. Barykina O., Zerkal O., Averin I., Samarin E. New Data on Geological Conditions of Landslide Activity on Vorobyovy Gory (Moscow, Russia)//Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk/Proc. 5thWLF 2020. Springer, 2021. V. 2, pp. 143-148.
14. Zerkal O.V., Sokolov V.N. Mechanism of soil deformations during the displacements of flow slides//Slope Stability Engineering: Proc. of the Internat. Symp. on slope stability engineering (IS-Shikoku '99, 8-11.11.99, Shikoku). Balkema, 1999. pp. 1403-1407

ОБВАЛЬНО-КАРСТОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ И ОЛЬХОВСКАЯ КАРСТОВАЯ БРЕКЧИЯ В КАРСТОВЫХ МАССИВАХ ПЕРМСКОГО КРАЯ

Ю.А. Килин, И.И. Минькевич, Д.Р. Фаисханов

Пермский государственный национально-исследовательский университет,
614990, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15. E-mail: iks-org@mail.ru

На территории Пермского края выходят на поверхность или залегают близко от нее карстующиеся породы: известняки, доломиты, гипсы, ангидриты, каменная и калийные соли. Площадь карстующиеся пород составляет 30 тыс. км² [1]. В тектоническом отношении западная часть края представлена окраиной Восточно-Европейской платформы, центральная часть – Предуральским краевым прогибом, восточная часть – складчатым Уралом. Наиболее закарстованы породы девонской, каменноугольной и пермской систем. Пермские отложения занимают большую часть платформы и прогиба, их средняя мощность составляет 700 м, увеличиваясь до 1500-2000 м вблизи складчатого Урала. В Пермском крае широко развиты поверхностные и подземные формы карста. Наряду с формированием карстовых форм происходит их заполнение обломочным материалом с последующей его цементацией. С поверхности карстовых массивов формируются карстовые брекчии, имеющие широкое площадное распространение. В карстовых пустотах идет накопление суффозионного и гравитационного материала, который со временем также подергается цементации.

По классификации осадочных обломочных пород брекчия является грубообломочной сцементированной горной породой, состоящей из угловатых обломков и цемента. На территории Пермского края карстовые брекчии образуют пластовые залежи на коренных нижнепермских породах в центральной части края. Общая площадь карстовых брекчий по данным Н.В.Лавровой, составляет 3910 км². Брекчии распространены в Полазнинском, Нижнесыльвенском, Иренском, Кишертском карстовых районах и районом Уфимского плато. Местами они выходят на поверхность или перекрыты элювиально-делювиальными грунтами, или залегают под теригенно-карбонатными отложениями соликамского горизонта кунгурского яруса Р₁ [3].

Рассмотрим брекчии иренского карстового района. Брекчии являются остаточным продуктом выщелачивания пород иренского горизонта Р₁, которые состоят из неокатанных различной формы и размеров обломков доломитов, известняков, реже гипсов, ангидритов, песчаников, алевролитов, сцементированных глинистым, карбонатно-глинистым и карбонатным цементом.

Для этой брекчии характерна глыбово-кусковатая текстура, кавернозность и пористость, полное отсутствие слоистости, неоднородный состав цемента. Обломки в цементе располагаются беспорядочно: лежат свободно среди цементирующего материала или соприкасаются друг с другом. Форма обломков неправильная: угловатая, реже слабоокатанная. Обломки занимают в породе более 50%. Размер обломков от нескольких мм до глыб в несколько метров в поперечнике. Брекчия содержит большое количество угловатых каверн, возникших за счет беспорядочного расположения отдельных обломков и в результате дальнейшего выщелачивания более слабых участков. Каверны выполнены доломитовой мукой, глиной, кальцитом. Поверхность обломков, трещин и пустот покрыта натечными корочками кальцита, халцедона, пленкой гидроксидов железа и дендритами марганца. Среди обломков наблюдаются остроугольные включения серого кремня размером от 0,1 до 15 см. В составе брекчии наблюдаются местами хорошо окатанные галька и гравий, реже полуокатанные размером от 1 до 5 см. На одних участках наблюдаются крепкосцементированные, на других цементация слабее, а третьи вообще не имеют цемента.

По мнению А.В. Турышева механизм цементации глыбового материала связан с подземными водами зон вертикальной и горизонтальной циркуляции, отлагающих углекислый кальций. В брекчиях, залегающих на различных пачках иренского горизонта, цемент чаще слабый известково-глинистый, алевролитовый или состоит из доломитовой муки [4]. Возможно, это указывает на более молодой возраст брекчии.

Брекчия, залегающая на филипповском горизонте, представлена более крепкой породой, цемент глинисто-известковый, известковый, кремнисто-известковый.

По данным споропыльцевых анализов возраст брекчии отнесен к акчагальским и апшеронским отложениям [5]. Другими авторами возраст брекчии определен как верхнеплиоценовый. Единого мнения о времени образования ольховской карстовой брекчии нет. Учитывая, что при образовании ее основную роль сыграли карстовые процессы, которые наиболее интенсивно протекали в неоген-новое время и современную эпоху, то условно это неоген-четвертичные отложения (N-Q).

Мощность ольховской брекчии непостоянна, т.к. эрозионная подошва подстилающих пород неровная, карманообразная и увеличивается с востока на запад от 10-40 м на востоке, до 40-60 м на западе, а с севера на юг от 40 до 60-70 м, в отдельных случаях до 100-114 м. Уменьшение мощности к востоку связано с большей приподнятостью района.

В отличие от брекчий, современные несцементированные обвальное-карстовые отложения распространены в карстовых полостях зон сильнозакарстованных гипсовых массивов. Они образовались в результате обвалов сводов пустот в гипсах, а также в терригенных грунтах, имеют разную степень плотности: от рыхлых (чаще встречаемых) до плотных и представленных супесью твердой, пластичной со щебнем терригенных пород, суглинистым туго-, мягко-, текучепластичным материалом со щебнем, дресвой и глыбами гипса и терригенных пород, щебенистым грунтом с суглинистым туго-, мягкопластичным заполнителем, щебнем, дресвой, глыбами терригенных пород и гипса.

По данным, полученным в результате буровых работ на Ясыльском карстовом поле в Ординском районе, в 146 скважинах было вскрыто 236 карстовых полостей. Большинство карстовых полостей было из них – в иренских сульфатно-карбонатных отложениях. По литологической приуроченности эти полости образованы в гипсах, намного реже в ангидритах. В 43 скважинах было вскрыто 102 открытых незаполненных карстовых полости. В процентном отношении, открытые полости составляют 43% от общего количества полостей [2].

134 карстовых полости являются незаполненными и в процентном отношении составляют 57% (Рис. 1).



Рис. 1 Виды вскрытых карстовых полостей.

По характеру заполнителя преобладают тонкодисперсные отложения, а именно суглинки. Данный заполнитель был встречен в 90 полостях, что составляет 67% от их общего количества.

Вторым по количеству отмечается обломочный материал, который в основном представлен глыбами и щебнем гипса. Он представлен в 20 полостях исследуемой территории, что составляет 15%.

Третьим является суглинисто-щебенистый заполнитель, который был встречен в 13 полостях и составляет 9,7% (Рис. 2).

Также были встречены в качестве заполнителя обвальное-глыбовые отложения (в 6 полостях) – 4,5%, щебенистый грунт (2 полости) – 1,5%. Помимо этого заполнителем являются глинистый, суглинисто-супесчаный, суглинисто-сульфатный материалы, которые были встречены в единичных полостях.

По глубине вскрытия можно сделать вывод, что основное количество карстовых полостей не превышает глубину 15,0 м. Интервалы их распределения находятся на глубинах 0-5,0, 5,0-10,0, 10,0-15,0 м (Рис. 3). Количество полостей в этом диапазоне составляет 46, 95, 67 штук соответственно. Глубина вскрытия полостей изменяется от 0,6 (скв. № 128) до 39,5 м (скв. № 2).

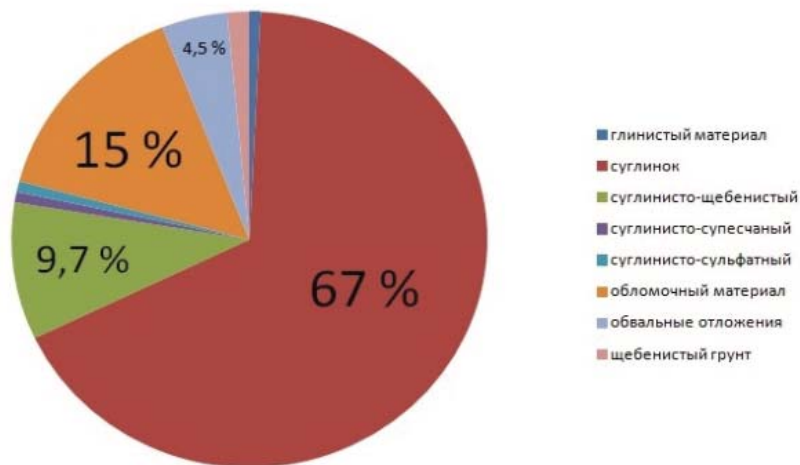


Рис. 2 Распределение карстовых полостей по характеру заполнителя.

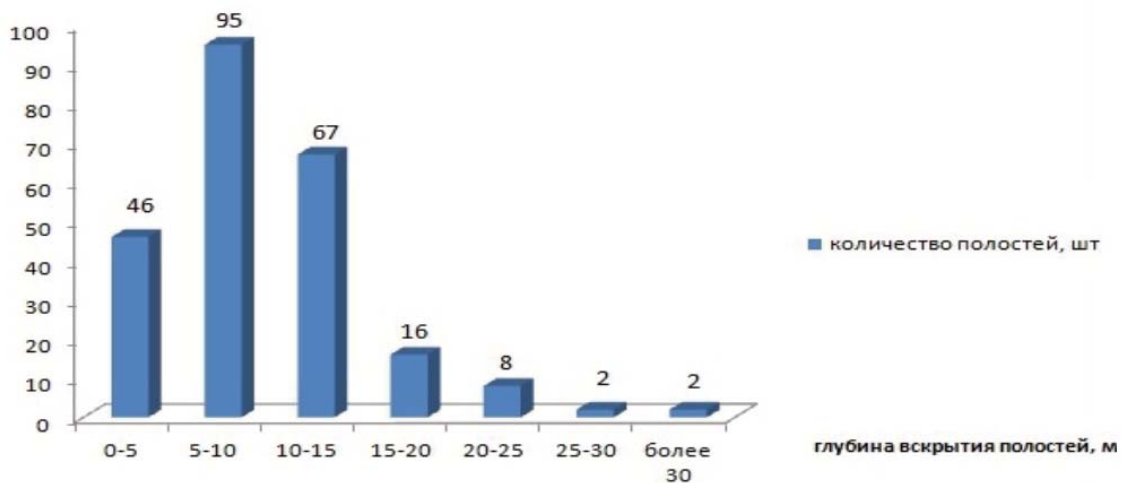


Рис. 3. Распределение карстовых полостей по глубине.

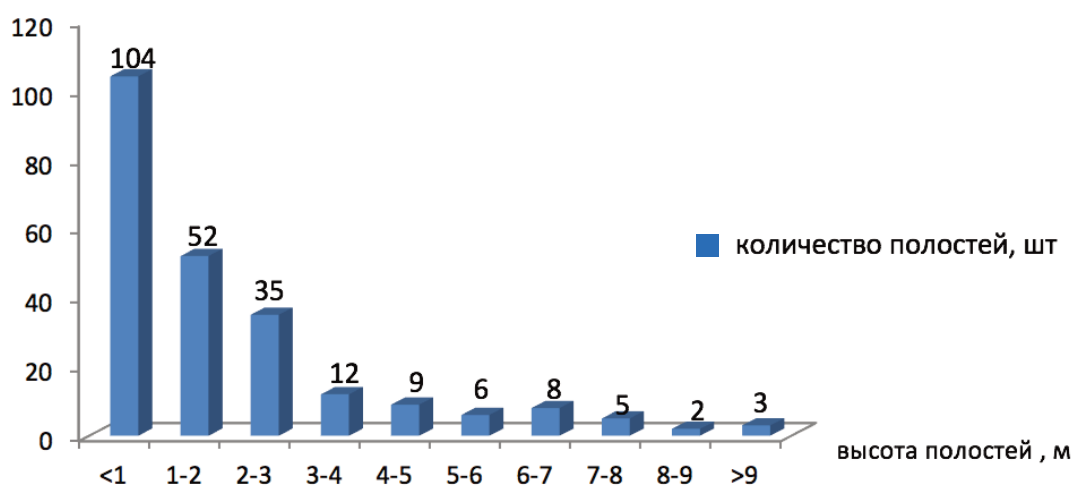


Рис. 4. Распределение карстовых полостей по высоте.

Большинство полостей не превышает в высоту 2,0 м (Рис. 4). В основном они представлены как полостями, так и полостями-трещинами, высота которых не превышает 0,2 м. Средняя высота полостей равна 1,7 м. Самая высокая полость (12,4 м) была вскрыта в скв. № 55.

Рассчитан линейный коэффициент внутренней закарстованности (заполненных обвальюно-карстовых отложений и незаполненных полостей) карстового поля (табл.1).

$$Kl = \frac{\sum h_c}{lb}$$

где h_c – высота заполненной (незаполненной) карстовой полости, lb – мощность карстующихся пород.

Таблица 1.							
Линейный коэффициент внутренней закарстованности							
№ участка	1	2	3	4	5	6	7
Заполненные, д.ед.	0,37	0,27	0,32	0,11	0,21	0,19	0,53
Незаполненные, д.ед.	0,7	0,12	0,07	0,05	0,2	0,2	0,1

Наибольшее значение внутренней закарстованности отмечено на участке № 7, а наименьшее значение было получено на участке № 4. Это связано с большой высотой карстовых полостей на участке № 7, где их общая высота составляет 48,1 м. На участке № 4 карстовые полости в основном по высоте не достигают и 1,0 м и их сумма составляет 10,1 м.

Для сравнительной характеристики были изучены физические и физико-механические свойства элювиально-делювиальных четвертичных, обвальюно-карстовых отложений и неоген-четвертичных отложений, верхней сильновыветрелой толщи терригенных грунтов соликамского горизонта нижней перми (P_{1sl}). Для карстующихся отложений гипсов и ангидритов определялся предел прочности на одноосное сжатие и коэффициент их выветрелости (табл.2,3).

Таблица 2.					
Показатели физико-механических свойств грунтов Ясылыского участка					
Показатели	Глина (edQ)	Суглинок (edQ)	Обвальюно-карстовые		Алеврит, песок, сильновыветрелый (P_{1sl})
			Суглинки с щебнем (N-Q)	Супеси с щебнем (N-Q)	
Естественная влажность, д.ед.	0,24	0,22	0,15	0,21	0,13
Плотность грунта, г/см ³	1,97	1,96	2,06	1,70	2,05
Коэффициент пористости, д.ед.	0,70	0,68	0,52	0,95	0,52
Степень влажности, д.ед.	0,9	0,88	0,81	0,61	0,735
Коэффициент фильтрации, м/сут	0,0034-0,005	0,015-0,0061	0,5	0,36	0,06
Модуль деформации, МПа	15	8	5	10	20
Сцепление, кПа	40	45	10	8	10
Угол внутреннего трения, град.	22	35	38	31	38

Таблица 3.		
Показатели физико-механических свойств активно карстующихся гипсов и ангидритов		
Показатели	Гипс ($P_{1kg_{г}}$)	Ангидрит ($P_{1kg_{г}}$)
Плотность грунта, г/см ³	2,27	2,71
Предел прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии, МПа	11	88
Коэффициент выветрелости, д.ед.	0,71	0,97

По результатам лабораторных исследований Ясылского участка было установлено, что изменение характеристик грунтов неравномерно и в плане, и по глубине. По материалам исследований было выявлено, что фильтрационные свойства элювиально-делювиальных глинистых грунтов различны в зависимости от геоморфологического расположения. Суглинки, приуроченные к логам, как правило, имеют низкие значения коэффициента фильтрации, а суглинки, залегающие выше эрозионных врезов, в зонах вертикальной нисходящей фильтрации имеют высокие значения коэффициента фильтрации. Обвальное-карстовые отложения более пористые, имеют высокий коэффициент фильтрации, низкие значения модуля деформации до 5 МПа, низкие значения сцепления до 8-10 кПа. В керне наблюдается начальная стадия цементации, представленная стяжениями в виде гнезд селенита и кальцита.

Обвальное-карстовые отложения в карстовых полостях с течением времени при понижении базиса карстования будут перемещаться в ниже сформированные полости и так будет продолжаться до тех пор, пока карстом не будут переработаны все пачки гипсов, ангидритов, известняков до филипповских доломитов, которые практически не подвержены выщелачиванию. На участках, где этот процесс закончился, наблюдается площадное распространение карстовых брекчий, которые находятся восточнее Ясылского поля. Граница расположена на контакте филипповского и иренского горизонтов кунгурского яруса Р₁. Ширина полосы выхода брекчий составляет 8-10 км, мощность их увеличивается с запада на восток от 10-15 м до 60 м и более. Карстовые брекчии залегают на филипповских доломитах, мало подверженных выщелачиванию, состоят из глыб до 0,5 м и обломков различной величины и формы, содержащих фауну пород неволинской и елкинской пачек иренского горизонта.

Однако, механизм формирования обвальное-карстовых отложений и их преобразования их в карстовую брекчию до конца не изучен и требует дальнейших исследований.

Литература

1. Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г. Карст и пещеры Пермской области. Пермь, Из-во Пермского университета. 1992.
2. Клилин Ю.А., Минькевич И.И. Полости Краснояльского карстового поля // Пещеры: Межвуз. Сб. науч. тр./ Перм. ун-т., Пермь. 1999, с.52-57.
3. Лаврова Н.В. Автореферат кандидатской диссертации. Закономерности распространения и формирования карстовых брекчий (на примере Пермского края). Пермь, 2000
4. Турышев А.В. Гидродинамические и гидрохимические особенности развития карста в карбонатных и сульфатных породах // Проектирование, строительство и эксплуатация земляного полотна в карстовых районах. М.: Транспорт, 1968, вып.8.
5. Яхимович В.Л., Немкова В.К., Сиднев А.В. и др. Плейстоцен Предуралья. М.: Наука, 1987.

ВЛИЯНИЕ ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА АКТИВНОСТЬ РАЗВИТИЯ КАРСТА

Т.Г. Ковалёва^{1,2}, З.В. Селина^{1,2}, В.А. Чижова², А.А. Новикова^{1,2}

¹ ФГАОУВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»,
614068 г. Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: kovalevatg@mail.ru

² ООО «ПКИБЗ», 127018, г. Москва, ул. Суцёвский Вал, д. 5, стр. 3

Проблема оценки карстоопасности территории в связи с широким освоением и новым строительством, в том числе линейных протяженных объектов, является актуальной и дискуссионной. На настоящий момент отсутствуют единые правила и подходы к определению опасности карста, зачастую в разных частях страны оценка производится по-разному, с учетом региональных особенностей. С одной стороны, это хорошо и обосновано, так как при оценке карстоопасности должны учитываться индивидуальные особенности и условия развития карста, с другой стороны, возникают прецеденты, когда нормы, работающие и обоснованные в условиях одного региона, пытаются применять в условиях развития карста другого региона, особо не углубляясь в различия геологического строения. В частности, одним из критериев отнесения территории к некарстоопасной является наличие мощной толщи глинистых пород.

В актуализированной нормативной литературе также появился подобный признак неопасной в карстово-суффозионном плане территории. Например, такой признак неопасной категории присутствует в СП 22.13330.2016 [5]: наличие водоупора, покрывающего водорастворимые горные породы, мощностью более 10 м (табл. 6.16 [5]).

Водоупор – выдержанные слабопроницаемые породы, изолирующие смежные элементы гидрогеологического разреза [1]. К таким, практически непроницаемым породам относятся суглинки, глины и все массивные кристаллические и осадочные породы, если они не трещиноватые [2]. То есть согласно упомянутому нормативному документу, если мы имеем на участке толщу глинистых пород, перекрывающую карстующиеся отложения, мощностью 10 м и более, то при прочих условиях (отсутствии на поверхности деформаций, полостей внутри карстового массива, значение градиента вертикальной фильтрации менее 1) территорию можно отнести к неопасной. Практика же карстологических исследований говорит о том, что не все глинистые отложения могут служить абсолютной защитой для карстующихся пород. Водоупорные и защитные свойства зависят прежде всего от физико-механических свойств глинистой толщи, наличия прослоев, включений в ней.

Таблица 1.

Физико-механические характеристики перекрывающих глинистых грунтов							
Наименование грунта	Естественная влажность	Число пластичности	Коэффициент пористости	Плотность грунта	Угол внутреннего трения	Удельное сцепление	Модуль общей деформации
	W	J _p	e	ρ	φ	C	E
	%	%	д.е.	г/см ³	град.	МПа	МПа
Глина твердая (J _{3,0} +km)	37,12	36,8	1,069	1,79	17	0,097	30
Глина твердая (C ₃)	18,10	22,6	0,570	2,06	25	0,094	41
Глина (P ₂ шг)	23,40	22,9	0,695	2,01	20	0,054	38
Суглинок твердый	18,30	14,4	0,628	1,97	21	0,032	24

Горная выработка с-15-75а
 Абсолютная отметка устья 133.60 м

Дата проходки 11.03.2020
 Масштаб колонки 1:300

Геол. Вязр.	Глуб. Подоз., м	Абс. отм., м	Мощн. слоя, м	ИГЭ	Литологический разрез	Описание грунтов	Появл. воды	Устан. воды
tIV	0,8	132,80	0,8	1*2		Насыпной слой суглинков серовато-коричневых, полутвердых	0,8	0,8
eII	4,8	128,00	4,0	3в2		Песок средней крупности светло-коричневый, серо-коричневый, водонасыщенный, с вкл. гальки, гравия, средней плотности		
бIII	7,5	126,10	2,7	2*4		Суглинок коричневый, мягкопластичный, с примесью орг.в-в		
FдгI-II	10,0	123,60	2,5	14в2		Песок средней крупности серый, зеленовато-серый, водонасыщенный, с вкл. щебня, дресвы, средней плотности		
FдгI-II	10,8	122,80	0,8	14*3		Суглинок серый, зеленовато-серый, т*г*о*п*л*а*с*т*и*ч*н*ы*й		
						Глина темно-серая, твердая, набухающая		
Узачк	25,6	108,00	14,8	21*1*			25,6	25,6
СЗ	27,1	106,50	1,5	24*7		Известняк светло-серый, обводненный, трещиноватый, сильновыветрелый, оцнизк*п*р*оч*н*о*с*т*и		
						Глина пестроцветная, твердая, набухающая, мергелистая		
СЗ	35,1	98,50	8,0	24*1*				
						Известняк светло-серый, обводненный, трещиноватый, сильновыветрелый, сло*о*к*о*в*е*р*н*о*з*н*ы*й, низкая п*р*оч*н*о*с*т*и		
СЗ	39,1	94,50	4,0	24*6				
СЗ	40,9	92,70	1,8	24*7		Мергель красновато-коричневый, обводненный, трещиноватый, сильновыветрелый, оцнизк*п*р*оч*н*о*с*т*и		
						Глина пестроцветная, твердая, набухающая, мергелистая		
СЗ	50,0	83,60	9,1	24*1*				
						Известняк светло-серый, обводненный, трещиноватый, сильновыветрелый, оцнизк*п*р*оч*н*о*с*т*и		
СЗ	54,6	79,00	4,6	24*7				
						Известняк светло-серый, обводненный, трещиноватый, сильновыветрелый, сло*о*к*о*в*е*р*н*о*з*н*ы*й, п*о*н*и*ж*е*н*н*ы*й п*р*оч*н*о*с*т*и		
СЗ	60,0	73,60	5,4	24*6				

Рис. 1. Колонка инженерно-геологической скважины, пройденной на территории г. Москвы.

Необходимо отметить, что в СП 11-105-97 ч.II (п. 5.1.7) [4] в качестве толщи, как правило, обеспечивающей защиту от возможности появления карста на земной поверхности, может изменяться от 10-30 м (при выдержанной мощности плотных глин, с отсутствием линз и прослоев песка, супеси, водоносных суглинков, трещин и других нарушений) до 60-100 м (при наличии в покрывающей толще слоев песков, песчаников, мергелей, а также тектонических нарушений). Такая формулировка как раз соответствует практическому опыту карстологических исследований и строению участков отсутствия или развития карстовых форм.

Несложно догадаться, откуда такой признак появился в актуализированной версии СП 22.13330.2016. Если мы обратимся к Инструкции по инженерно-геологическим и геоэкологическим изысканиям в г. Москве [3], то заметим, что эта норма заимствована из них, в несколько измененном виде. Так, п. 4.8.6 [3] говорит о том, что «неопасные районы характеризуются отсутствием проявления карста на поверхности земли, наличием водоупоров из юрских и каменноугольных глин, толщиной, как правило, более 10 м и отсутствием нарушенного режима подземных вод. Таким образом, здесь подчеркивается возраст глинистых отложений (юрский или каменноугольный), которые могут считаться достаточной защитой при мощности 10 м и более. В федеральном

Горная выработка с-1пкв (ПК 2910+43) Дата проходки 11.02.2016

Абсолютная отметка устья 117,20 м Масштаб колонки 1:300

Геол. Вязр.	Глуб. Подощ, м	Абс. Отм., м	Мощн. слоя, м	№ слоя	Литологический разрез	Описание грантов	Появл. Воды	Устан. Воды
Р2пк	2,3	114,90	2,3	16		<p>Песок коричневатый, средняя крупности, малой степени водоносности</p> <p>Глина красно-коричневая, твердая, трещиноватая, с линзами алевролита серого, известковистого, с редкими прослоями песка мелкого и редкими известковистыми включениями</p>		
Р2пг	49,1	68,10	24,0	25		<p>Долерит светлосерый до белого, прочный, очень плотный, слоистострельчатый, неравнозернистый, коверчатый, коверны заполнены светлокоричневым негелем</p>	26,0	45,3
Р2пк	60,4	56,80	11,3	33		<p>Алевролит серый прочный, плотный, слоистострельчатый, неравнозернистый, сильноцементированный, с включениями ценного гипса</p>		49,1
Р2пк	66,5	50,70	6,1	34		<p>Гипс сероватый средней пластности, плотный, слоистострельчатый, неравнозернистый, крупнокристаллический трещиноватый, трещины заполнены коричневатой глиной</p>		
Р1	79,7	37,50	13,2	42		<p>Долерит серый прочный до средней пластности, очень плотный, слоистострельчатый, неравнозернистый, коверчатый</p>		79,7
Р1	87,0	30,20	7,3	44		<p>Долерит серый прочный до средней пластности, очень плотный, слоистострельчатый, неравнозернистый, коверчатый</p>		

Рис. 2. Колонка скважины, пробуренной возле провала в районе д. Пивоварово Владимирской области.

же нормативном документе указание на возраст потерялось, а ведь это существенное уточнение, так как глины различного возраста и генезиса характеризуются различными физико-механическими свойствами, которые, как уже отмечалось ранее, являются основой для оценки водоупорных свойств.



Рис. 3. Карстовый провал 2016 г. в районе д. Пивоварово.



Рис. 4. Карстовый провал в Арзамасском районе Нижегородской области.

Рассмотрим примеры наличия карстовых деформаций при различной мощности и свойствах глинистых грунтов.

На территории г. Москвы и Московской области карстующимися отложениями являются преимущественно известняки и доломиты каменноугольного возраста, перекрывающимися отложениями часто служат каменноугольные и юрские глинистые отложения (Рис. 1). Провалы здесь происходят достаточно редко, это связано с медленным растворением карбонатных пород и развитием перекрывающего глинистого водоупорного слоя, который обладает определенными свойствами (табл. 1).

Совершенно другая картина наблюдается, например, на территории Владимирской и Нижегородской областей, где также широко развиты перекрывающие глинистые отложения, преимуще-

Горная выработка с-4/37к
 Абсолютная отметка устья: 155,00 м

Дата проходки: 26.05.2021
 Масштаб колонки: 1:300

Геол. возр.	Глуб. подош., м	Абс. отм., м	Мощн. слоя, м	ИГЭ	Литологический разрез	Описание грунтов	Появл. воды	Устан. воды
Flq0	1,0	154,00	0,9	42		Почвенно-растительный слой Песок серый, средней крупности, рыхлый, малая степени водонасыщения, с прослоями суглинка, с включениями органики		
Flq0	8,7	146,30	7,7	30		Суглинок коричневый, тяжелый, твердый, песчанистый, с прослоями песка, в интервалах 6,7-7,2 м и 7,45-7,55 м прослой песчанника		
Flq0	12,2	142,80	3,5	34		Глина серая до коричневая, легкая, тугопластичная, пылеватая, с прослоями песка		
Flq0	18,0	137,00	5,8	42		Песок серый до коричневого, средней крупности, рыхлый, малая степени водонасыщения, с прослоями мажи известняка и глины, в интервале 17,4-17,7 м прослой песка желтого, крупного, средняя плотности, малая степени водонасыщения		
P2ur	38,0	117,00	20,0	103-1		Суглинок коричневый, твердый, в интервалах 22,2-22,5 м, 25,4-25,8 м, 30,3-31,5 м прослой известняка серо-белого, малопрочного, сильновыветрелого до щебня и дресвы	38,6	
P2ur	53,5	101,50	15,5	103		Суглинок серый, полутвердый, в интервалах 44,0-43,6 м и 30,3-33,3 мягкопластичный, в интервале 48,7-50,3 и текучепластичный, в интервале 42,1-42,6 м прослой песка коричневого, мелкого, средняя плотности, малая степени водонасыщения, в интервалах 39,1-40,0 м, 43,5-44,0 м прослой известняка серо-белого, малопрочного, сильновыветрелого до щебня и дресвы, с прослоями доломита серого, прочного, средневыветрелого		
	60,9	94,10	7,4			Провал бурового инструмента	45,0	
P1s	64,0	91,00	3,1	135	Гипс серо-белый, очень низкой прочности, с 62,2 м пониженной прочности, средневыветрелый, разрыхленный, в интервале 61,6-63,2 м прослой силеси серая, полутвердая, с включениями щебня доломита и гипса, R0D 20%			

Рис. 5. Колонка скважины, пробуренной возле провала в Арзамасском районе Нижегородской области.

ственно пермского возраста, они обладают иными физико-механическими свойствами (табл. 1). Зачастую здесь можно наблюдать активное провалообразование даже при слое перекрывающей глинистой покровной толщи более 10 м (Рис. 2-5). Если мы обратимся к описанию этих глин, то заметим, что они имеют многочисленные включения и прослои песчаников, алевролитов, мергелей и т.д., то есть они неоднородны по составу и свойствам, в связи с чем в толще глин могут образовываться зоны разуплотнения и повышенной трещиноватости, по которым атмосферные осадки могут проникать в карстующуюся толщу. Глинистые грунты обладают высоким сцеплением, благодаря которому они могут долго держать своды карстовых полостей, которые в свою очередь могут формироваться в системы подземных пустот.

Например, в Нижегородской области при инженерно-геологических изысканиях на участке с высоким скоплением карстовых форм (Рис. 4) при бурении скважины произошел провал бурового инструмента, высота карстовой полости составила была 7,4 м (Рис. 5), сверху мы можем наблюдать перекрывающую глинистую толщу мощностью 35,5 м. Учитывая наличие поверхностных карстовых форм, можно предположить, что в скором времени данная полость, достигнув критических размеров, выйдет на поверхность.

Таким образом, наличие мощной перекрывающей глинистой не исключает процесс провалообразования. При анализе условий и факторов развития карста важно обращать внимание на генезис, возраст, сложение перекрывающей глинистой толщи, как видно из табл. 1, юрские и каменноугольные глины, обеспечивающие в условиях развития карста г. Москвы, надежную защиту, обладают очень высоким удельным сцеплением, тогда как пермские глинистые отложения имеют значительно меньшие значения удельного сцепления, а также характеризуются наличием различных включений и прослоев. В случаях, когда на поверхности видны карстовые формы, конечно, исключать развитие процесса нельзя. Когда же этих форм, на первый взгляд нет, а перекрывающая глинистая толща достаточно мощная и есть соблазн рекомендовать VI категорию устойчивости территории относительно провалообразования, то необходимо свои прогнозы подтверждать расчетом либо моделированием, тогда будет минимизирована вероятность ошибки, а с ней и недооцененности процесса карста. Необходимо заметить также, что в активности развития провалообразования одну из главных ролей играет литологический тип карста, однако к сожалению, в действующей редакции СП22.13330.2016 в признаках процесса, этот пункт отсутствует. Таким образом, положения, касающиеся характеристики перекрывающей толщи, закрепленные в СП11-105-97 ч.II [4] в большей степени соответствуют природе карстового процесса.

Литература

1. *Всеволожский В.А. Основы гидрогеологии: Учебник. М., Изд-во МГУ, 2007, 448 с.*
2. *Шварцев С.Л. Общая гидрогеология: Учебн. Для вузов. М., Недра, 1996, 423 с.*
3. *Инструкции по инженерно-геологическим и геоэкологическим изысканиям в г. Москве. М., Правительство Москвы, Мосархитектура, 2004.*
4. *СП 11-105-97 ч.II. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. М., Госстрой России, 2000.*
5. *СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. М.: Минрегион России, 2016.*

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ЭТАПАХ ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

В.С. Козлов, Л.А. Стороженко, Э.Д. Мазайтова, И.А. Королева

Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, 620144.
E-mail: office@ursmu.ru

Актуальность

Разработка месторождений полезных ископаемых оказывает огромное преобразующее воздействие на геологическую среду нарушая рельеф, структуру, состояние, свойства, температурный режим массивов пород. Масштаб данных воздействий зависит от объема извлекаемых пород, глубин выработок, технологии работ. Таким образом, внедрение человека в геологическую среду нарушает сложившиеся в ней природное равновесие, что приводит к развитию в бортах карьеров, стенках подземных горных выработок инженерно-геологических процессов (Рис. 1.).



Рис. 1. Осыпь (слева), вывал (справа) в борту карьера.

Причиной тому являются трансформация полей: естественных напряжений, температур и других. Формирование инженерно-геологических процессов осложняет процесс горных работ и влияет не только на безопасность работ, но и на экономику предприятия.

Изучение и анализ строительства и эксплуатации горных выработок показывает, что развитие инженерно-геологических процессов на месторождениях, особенно, расположенных в районах развития многолетнемерзлых пород, возникают в связи с неполным учетом в расчетных схемах индивидуальностей отдельных участков месторождений.

Методика

Целью данной работы является обоснование методов прогноза устойчивости горных выработок, реально учитывающих инженерно-геологические особенности месторождений полезных ископаемых. Для решения поставленной задачи необходимо использовать комплексный подход, включающий в себя: анализ естественно-исторических условий; фациальный на основе системного анализ и методы прогнозирования (аналогий, сравнительно-геологический, математического моделирования, аналитический).

Системный анализ, учитывающий последовательное изучение инженерно-геологических условий, включает в себя целый комплекс работ, выполняемых по нескольким направлениям: 1) получение информации о геологической среде; 2) обоснование условий разработки месторождений полезных ископаемых на основе инженерно-геологических данных (рис. 2).

Предложенная последовательность решения задачи, в обеспечении условий разработки МПИ реальными инженерно-геологическими данными позволяет решить следующие задачи:

- 1) выделить в пределах поля месторождения участки, отличающиеся индивидуальными особенностями, то есть разной степенью устойчивости, при вскрытии их горными выработками;
- 2) определить возможность развития в пределах участков тип инженерно-геологических процессов и их масштабность;
- 3) определить устойчивые параметры сооружений – бортов карьеров и уступов.



Рис. 2. Схема последовательности изучения условий для разработки месторождения полезных ископаемых.

В основе предложенной последовательности решения задачи лежат следующие методологические принципы:

- 1) обеспечение условий разработки МПИ реальными инженерно-геологическими данными на этапах поисково-разведочных работ, достигаются только при комплексном использовании специальных методов изучения с применением инженерно-геологических, гидрогеологических и геофизических методов при оптимальном их сочетании;
- 2) все используемые виды работ взаимосвязаны так как это обусловлено поставленной целью;
- 3) изучение и анализ инженерно-геологических условий выполняется для целей построения оптимальной инженерно-геологической модели.

Пример

Охотско-Чукотский вулканогенный пояс, является составной частью Тихоокеанского золото-серебряного кольца, что предопределило сосредоточение большого количества месторождений. Металлогения которых связана с процессами меловой тектоно-магматической активизации. В качестве примера рассмотрено эпитермальное золото-серебряное месторождение, расположенное в пределах данной области. В структурном отношении территория месторождения приурочена к Юго-Западной части Пареньского вулканического поля. Главной особенностью данной территории является блоковое строение. По результатам работ Ирбычанского поискового отряда в междуречье Гижиги-Аханджи в 1976-1978 гг. (под руководством Белоглазова Е.В., Усова П.Л.) было установлено, что Хивгичанская кольцевая кальдера сформировалась в месте сочленения ветвей Хивачского и Доктомышчанского разломов, раскалывающих брахиантиклиналь на отдельные крупные блоки. Кальдера выполнена верхнемеловыми вулканитами и обрамлена образованиями нижнего карбона, в которой и расположено месторождение (Рис. 3).

Месторождение в разрезе имеет одноэтажное строение. Вмещающими породами месторождения являются сложнопереключающаяся толща риолитов и их туфов верхнемелового возраста (K_2) и гидротермальных брекчий. Рудные тела представлены кварцевыми жилами. Все породы в процессе своего существования претерпели те или иные изменения, связанные с проявлением гидротермального метасоматоза. Характер и интенсивность которого зависела от состава и температуры гидротерм, структурно-тектонической обстановки и состава вмещающих пород.



Рис. 3. Геолого-структурная схема месторождения.

Анализ результатов лабораторных испытаний физико-механических свойств показал, что массив представлен породами от низкой прочности до средней прочности, которые характеризуются как размягчаемые и неразмягчаемые (табл. 1). Необходимо отметить, что какой-либо закономерности изменения свойств с глубиной и по простиранию не отмечается.

Таблица 1.

Физико-механические свойства пород разной прочности				
Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020	Плотность грунта, ρ, г/см³	Пределы прочности в сухом состоянии, МПа	Пределы прочности в водонасыщенном состоянии, МПа	Коэффициент размягчаемости, д.ед.
Низкой прочности, размягчаемые	2,25	6,1	2,2	0,36
Малопрочные, размягчаемые	2,30	22,2	11,5	0,58
Средней прочности, размягчаемые	2,34	43,7	33,1	0,78
Прочные, неразмягчаемые	2,44	91,7	79,9	0,87

Формирование трещиноватости массива пород, зон ослабления, слагающих разрез месторождения, происходило на протяжении всей истории его развития, под влиянием целого ряда факторов, таких как тектонические напряжения пород, процессы рудообразования, разгрузки, выветривания и т.д. Причем на каждой стадии развитие массива происходило под действием различных сочетаний этих факторов, а также разной временной продолжительности их действия.

В массиве пород преобладают сколовые трещины с ровными краями, поверхности трещин ступенчатые, волнистые, шероховатые иногда с бороздами скольжения. Трещины отрыва имеют неровные рваные края, поверхность их волнистая, бугристая. Ориентированы трещины под углами 70-80°, 40-50° и 50-60° к оси керна.

В целом в массиве пород месторождения можно выделить 2 типа заполнителя трещин: 1) ослабляющий прочностные свойства массива пород, представленный каолинитом, глиной трения, гидрослюдой; 2) усиливающий прочностные свойства массива пород, представленные карбонатом, кварцем, кварцем с пиритом (Рис. 4).



Рис. 4. Глинистый наполнитель открытой трещины (слева), кварц-карбонатный наполнитель (справа).

Главной особенностью месторождения является наличие крупных и мелких тектонических нарушений, которые формировали значительные по размерам зоны дробления. Горные породы в таких участках представлены обломками вмещающих пород и руд в виде дресвы и щебня, часто малопрочных, легко ломающихся руками, а могут быть представлены столбиками длиной до 10-15 см, характеризующимися интенсивной проработкой, покрытых серией микротрещин, заполненных каолинистом, гидрослюдой, которые при взаимодействии с водой размокают (Рис. 5).



Рис. 5. Зона ослабления, представленная дресвой и щебнем малопрочными.

Месторождение находится в зоне распространения многолетнемерзлых пород с орогенным мезотипом криолитозоны, характеризующейся преимущественно двухъярусным строением. Главные источники подземных водотоков на данной территории являются безнапорные воды аллювиальных отложений речных долин и трещиноватых эффузивов, а также глубокозалегающие напорные воды.

Термометрические наблюдения в скважинах показали, что верхний слой мерзлоты развит с поверхности и имеет мощность 10-30 м. Кровля нижнего (реликтового) слоя ММП залегает на глубинах 60-100 м, подошва реликтового слоя мерзлоты залегает на глубинах 80-240 м (Рис. 6).

По результатам геофизических исследований установлено, что центральная часть месторождения находится в талом состоянии и не содержит подземные воды. Предположительно это вызвано протекающими процессами окисления в рудных зонах и различием теплофизических характеристик вмещающих и околорудных пород (руд).

Главным источником водоприитоков в горную выработку будет являться несквозной талик под руслом водотока, мощностью до 60-80 м (Рис. 7).

Построение инженерно-геологической модели месторождения и прогноз изменения инженерно-геологических условий, определяющих устойчивость стенок и кровли подземных выработок выражается в виде геологических разрезов с прогнозным инженерно-геологическим районированием. Оценка устойчивости массива пород месторождения проводилась с использованием классификации Булычева Н.С. [5] и в ВСН 126-90 [6], что позволило получить относительные оценки устойчивости массива пород месторождения (Рис. 7).

По результатам расчетов, в разрезе месторождения в зависимости от степени устойчивости массива пород выделено 4 категории:

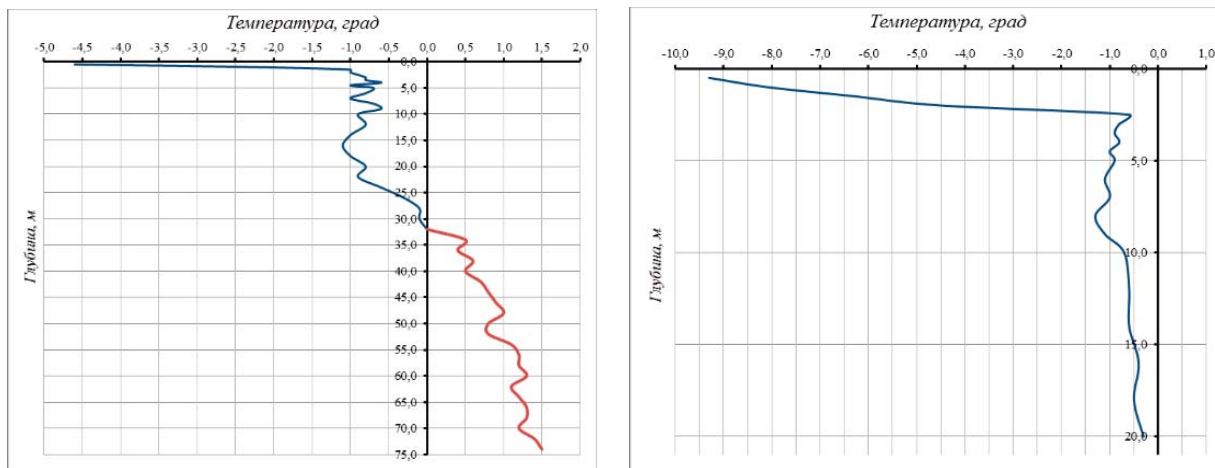


Рис. 6. Графики зависимости температуры горных пород от глубины.

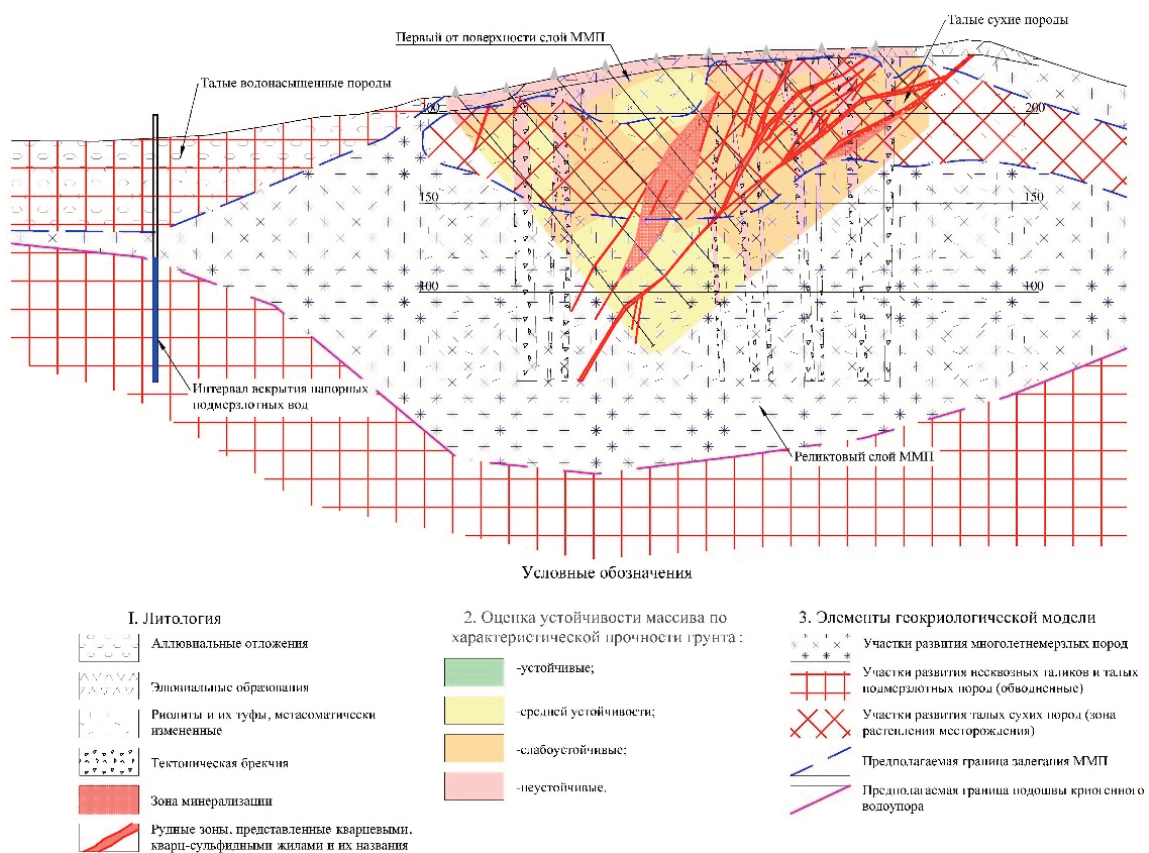


Рис. 7. Схематическая инженерно-геологическая модель месторождения.

– устойчивые (время стояния ствола в выработке без крепления от 1 до 6 месяцев). Участки таких пород развиты незначительно, представлены прочными породами, неразмягчаемыми, среднетрещиноватыми с маломощными зонами ослабления;

– средней устойчивости (время стояния ствола в выработке от 168 до 720 часов). Класс представлен прочными и средней прочности породами, среднетрещиноватыми, размягчаемыми с потерей прочности при водонасыщении от 10 до 40 %, с зонами ослабления;

– слабоустойчивые (время стояния ствола в выработке от 24 до 168 часов). Участки представлены породами средней прочности, малопрочными и низкой прочности, сильнотрещиноватыми, раздробленными, зоны ослабления мощностью до 55 м, размягчаемыми с потерей прочности при водонасыщении 20-74 %;

– неустойчивые (время стояния ствола в выработке менее 24 часов). Сложены аллювиальными отложениями, элювиальными образованиями, породами зон ослабления. Породы зон ослабления

представлены щебенистыми, дресвяными грунтами и малопрочными породами, размокающими с потерей прочности до 100%, зонами сильнотрещиноватых пород.

Таким образом, основными типами прогнозируемых деформаций являются: обрушения, вывалы, пучение (подземная отработка), осыпи, оползни, сдвиги блоков пород (открытая отработка).

Обрушения и вывалы будут развиваться на участках слабоустойчивых, неустойчивых пород в местах пересечения выработками зон ослабления дресвяно-щебнистого состояния, что потребует крепления стенок.

Пучение пород будет развиваться на участках слабоустойчивых и неустойчивых пород, где зоны ослабления сложены размокаемыми, малопрочными породами и в условиях увлажнения. Для избежания данной ситуации рекомендуем проходить такие участки с креплением.

Развитие осыпей, оползней возможно при вскрытии бортами карьера участков слабоустойчивых и неустойчивых. С целью предупреждения развития масштабных процессов рекомендуем выбрать оптимальный угол наклона бортов и уступов карьера, увеличить ширину бермы безопасности.

Литература

1. Абатурова И. В., Савинцев И. А., Зудилина Л. И., Стороженко Л. А., Борисихина О. А., Козлов В. С. Картирование таликов в зонах развития многолетнемерзлых пород с использованием комплекса методов (на примере месторождений полезных ископаемых) // 14-я Научно-практическая конференция и выставка «Инженерная геофизика 2018». Алматы, Казахстан, 2018 г.
2. Абатурова И.В., Стороженко Л.А., Савинцев И.А. Методические основы получения информации инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых //17-я конференция и выставка «Инженерная и горная геофизика 2021», 2021 г.
3. Абатурова И.В., Стороженко Л.А., Борисихина О.А., Козлов В.С. Инженерно-геологические условия золоторудных месторождений и особенности их изучения//Проблемы недропользования. 2016. № 2 (9), с. 32-38.
4. Акинин В.В., Миллер Э.Л. Эволюция известково-щелочных магм Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Петрология. 2011. № 3, с. 249–290.
5. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. М. Недра. 1994, 381 с.
6. ВСН 126-90. Крепление выработок набрызг-бетоном и анкерами при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов нормы проектирования и производства работ. Минтрансстрой. М., 1990.
7. Гидрогеология СССР, том XXVI. Северо-восток СССР. Северо-Восточное территориальное геологическое управление. Ред. О. Н. Толстихин.; М., «Недра», 1972, 297 с.
8. Ершов Э.Д. Общая геокриология. М.: Изд-во МГУ 2002 г.
9. Козлов В.С., Абатурова И.В., Звонарев, Е., Нугманова Э.Д. Оценка влияния таликовых зон на отработку месторождений полезных ископаемых 15 Конференция и выставка Инженерная и горная геофизика 2019, Геленджик 2019, с. 654–659.
10. Рац М.В. Чернышев С.И. Трещиноватость и свойства трещиноватых пород. М.: недра, 1980, 160 с.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКАРСТОВАННОСТИ И РАЗРУШЕННОСТИ КАМЕННОУГОЛЬНОГО КАРБОНАТНОГО МАССИВА НА ТЕРРИТОРИИ г. МОСКВЫ

И.В. Козлякова, И.А. Кожевникова, Н.Г. Анисимова

Институт геоэкологии им. Е.М.Сергеева РАН, 101000, Москва, Уланский пер., д.13.
E-mail: ivk.geoenv@yandex.ru

Территория Москвы – это классический район покрытого карбонатного карста. Закарстованные породы представлены здесь преимущественно известняками, реже доломитами и мергелями каменноугольного возраста. Глубина залегания их кровли изменяется от 5 до 100 и более метров. Выше повсеместно залегают мезозой-кайнозойские песчано-глинистые отложения.

Массив каменноугольного возраста представлен ритмичным переслаиванием карбонатных и терригенных толщ (Рис. 1). Наиболее древние каменноугольные породы, находящиеся в зоне влияния строительства, – это среднекаменноугольные известняки и доломиты мячковского горизонта и суворовской толщи. Над суворовской толщей залегают воскресенская глинистая толща, ратмировская карбонатная толща, неверовская глинистая толща, перхуровская карбонатная толща. Значительно меньше сохранилась от эрозионного размыва верхняя часть каменноугольного массива, представленная измайловской карбонатной и трошковской глинистой толщами.

Все карбонатные толщи в той или иной степени закарстованы, трещиноваты и разрушены. Основная их особенность – существование обломочных зон разной протяженности (от 1 до 10 и более м) не только в кровле массива, но и ниже её на достаточно большой глубине. Среди ненарушенных известняков могут встречаться также незаполненные каверны и трещины. Крупные полости (более 0,5–1 м) в карбонатном массиве практически не встречаются.

Присутствие закарстованных карбонатных пород в геологическом разрезе Москвы – основная причина развития карстово-суффозионного процесса и проявления на земной поверхности провалов

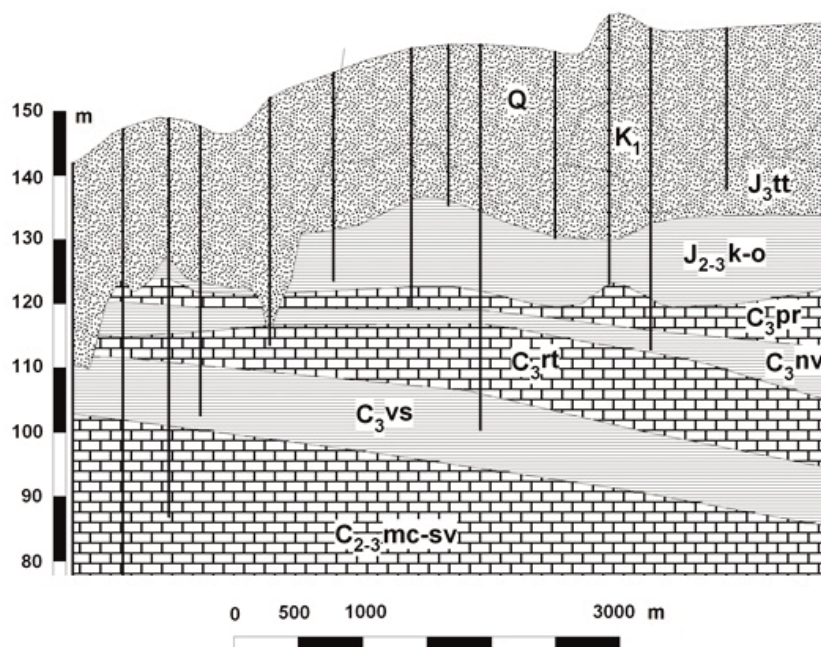


Рис. 1. Геологический разрез участка на северо-западе Москвы. Условные обозначения. C_{2-3} mc-sv – средне-верхнекаменноугольные известняки и доломиты мячковского горизонта и суворовской толщи.

Верхнекаменноугольные отложения: C_3 vs- глины и мергели воскресенской толщи; C_3 rt - известняки ратмировской толщи; C_3 nv - глины и мергели неверовской толщи; C_3 pr - известняки перхуровской толщи. J_{2-3} k-o - средне-верхнеюрские глины келловейского и оксфордского ярусов. J_3 tt – верхнеюрские песчано-глинистые отложения титонского яруса. K_1 - нижнемеловые пески. Q - четвертичные преимущественно песчаные отложения.

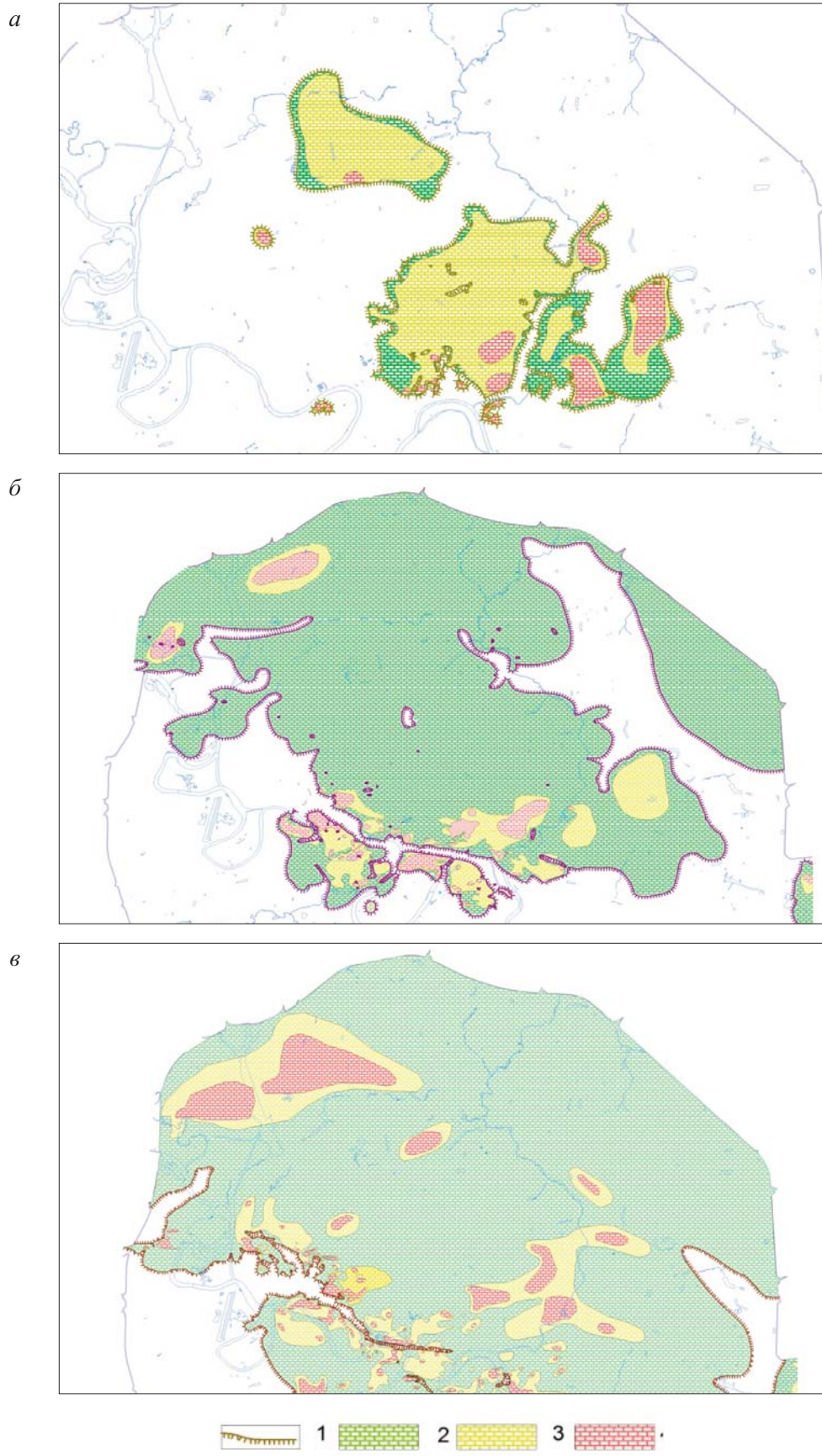


Рис. 2. Карты разрушенности верхнекаменноугольных карбонатных пород измайловской (а), перхуровской (б) и ратмировской (в) толщ.

Условные обозначения:

- 1 - граница распространения толщи; 2 - разрушенность толщи от 0 до 10%;
- 3 - разрушенность толщи от 10 до 50%; 4 - разрушенность толщи выше 50%.

и оседаний [1, 3]. В тоже время при оценке карстово-суффозионной опасности карбонатные породы обычно никак не характеризуются. И если для перекрывающей глинистой толщи существует такой критерий как её критическая мощность, а для силового воздействия подземных вод – критический градиент вертикальной фильтрации, то для карбонатного массива в настоящее время критериев пока не разработано. Таким критерием могла бы стать величина аккумуляционной емкости закарстованных пород, как характеристика объёма терригенного материала, который может поступить в полое пространство карбонатного массива при развитии карстово-суффозионного процесса [2].

При работе над «Картой опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов территории Москвы» [4] величину закарстованности попытались оценить в зависимости от длительности воздействия древней эрозии на карбонатные толщи. То есть считалось, что чем длительнее находились на земной поверхности и были подвержены разновозрастной речной эрозии карбонатные породы, тем более они закарстованны. Наличие закарстованных и разрушенных зон в тех частях массива, которые никогда не выходили на дневную поверхность, при такой оценке не учитывалось.

В 2021 г. были завершены работы по составлению карт разрушенности известняков верхнекаменноугольного возраста на территории Москвы (Рис. 2). При построении карт были использованы данные около 1700 скважин, находящихся в Базе данных ИГЭ РАН, и вскрывших карбонатную толщу каменноугольного возраста.

При изучении геологического описания разрезов скважин, подсчитывался процент разрушенности каждого выделенного прослоя толщи к общей мощности толщи. Данные выносились на карту распространения этой толщи и проводились изолинии для 10% и 50% разрушенности. Таким образом получилось построить три карты для измайловской, перхуровской и ратмировской толщ верхнего отдела каменноугольной системы (Рис. 2).

Зона разрушенности и повышенной трещиноватости измайловских отложений охватывает, в основном, северо-восточную территорию города и частично центральную часть (см. Рис. 2а). В областях распространения измайловских отложений на карте выделяются две изолинии по степени трещиноватости в процентах. Изолиния 10% практически совпадают с областью распространения этой толщи. Наибольшая разрушенность и трещиноватость, более 50%, наблюдается в районах: Киевского вокзала, Манежной площади и Александровского сада, развилки Ленинградского и Волоколамского шоссе, Дмитровского шоссе, восточнее парка Сокольники, в Лефортово.

Разрушенные более чем на 50% перхуровские отложения залегают в Дорогомилово, на Пресне, центральной части города, в Замоскворечье и Лефортово (Рис. 2б).

Ратмировские известняки, трещиноватые и разрушенные, распространены в западной части города - Звенигородское шоссе и Кутузовский проспект, в центре - от Библиотеки имени Ленина в сторону Лужников. А также в восточной части - Сокольники и шоссе Энтузиастов (Рис. 2в).

Разрушенность карбонатных пород - одно из условий возможного нарушения устойчивости закарстованной территории, то есть карстовой опасности. При картографировании опасности, обусловленной карстом на территории Москвы эта разрушенность ранее характеризовалась косвенно в зависимости от условий залегания карбонатных пород в геологическом разрезе. И только сейчас удалось получить пространственные характеристики состояния разновозрастных горизонтов каменноугольных карбонатных пород, базирующиеся на анализе и обработке огромного количества фактического материала. То есть появилась возможность добавить новые вспомогательные слои в геоинформационную систему (ГИС Москва), использование которых позволит более точно оценить карстовую опасность и риск на территории Москвы.

Литература

1. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска М.: РУДН, 2017, 328 с.
2. Аникеев А.В. Аккумуляционная емкость растворимых пород как основной показатель устойчивости районов покрытого карста *Геоэкология*, 2019. №5, с.3-14
3. Кутепов В.М., Кожевникова В.Н. Устойчивость закарстованных территорий. Наука, 1989, 151 с.
4. Кутепов В.М., Козлякова И.В., Анисимова Н.Г., Еремينا О.Н., Кожевникова И.А. Оценка карстовой и карстово-суффозионной опасности в проекте крупномасштабного геологического картирования г. Москвы // *Геоэкология*, 2011, № 3, с. 217-228.

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗЖИЖАЕМОСТИ ГРУНТОВ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

С.Г. Миронюк¹, В. Ю. Ионов²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119234,
г. Москва, ул. Ленинские горы, д.1,

²ПАО «НОВАТЭК», 119415, ул. Удальцова, д. 2
E-mail: mironyuks@gmail.com

Сейсмическое разжижение грунтов может вызывать значительные повреждения зданий и сооружений, возведенных на водонасыщенных дисперсных отложениях, прежде всего в связи быстрыми и, как правило, неравномерными вертикальными осадками отложений и их латеральными деформациями [5,6]. В морях негативные для сооружений последствия разжижений отложений возможны и при штормовых воздействиях на донные грунты.

Основной опасностью, связанной с разжижением для сооружений гравитационного типа (платформы, причалы и др.) является вертикальное перемещение поверхности морского дна, а для заглубленных трубопроводов - латеральное растекание осадков и возникновение эффекта положительной плавучести с возможной потерей защитного слоя грунта. Утрата этого слоя, в свою очередь, повышает вероятность повреждения линейных сооружений ледовыми образованиями в замерзающих морях.

Большое внимание рассматриваемой проблеме уделялось в ПНИИИС Госкомархстроя РСФСР в период становления сейсмического микрорайонирования (СМР), в т. ч. на шельфе. В начале 1990-х гг. в указанной организации были проведены исследования по прогнозированию остаточных деформаций в песчаных грунтах. Основные результаты выполненных исследований сводились к следующему:

1. Наибольшую склонность к разжижению проявляют водонасыщенные пески и супеси, реже суглинки.
2. В большинстве случаев сейсмодетформации в песчаных грунтах начинают проявляться при землетрясениях с интенсивностью (I) 7 баллов.
3. Разжижение в песчаных грунтах, как правило, локализуется в приповерхностных частях грунтовой толщи до глубины 5-10 м.
4. В процессе разжижения происходит оседание поверхности за счет динамического уплотнения рыхлых водонасыщенных отложений. При неравномерном уплотнении в массиве возникают многочисленные вертикальные трещины.
5. В случае даже незначительных уклонов поверхности (3-5°) возникают оползни разжижения, которые могут трансформироваться в обломочные потоки (согласно нашим исследованиям на шельфе Черного моря [13] оползни разжижения, как следствие сильных (6,0 < Mw < 8,0) землетрясений могут возникнуть при уклонах шельфа всего 1,5°-2,0°).

Для предотвращения аварий и инцидентов на площадках расположения морских объектов, согласно СП 504.1325800.2021 должны быть получены данные, необходимые для расчетов динамической устойчивости грунтов согласно ГОСТ Р 56353-2015.

Наш опыт изучения рассматриваемого явления в некоторых районах морей с высокой сейсмичностью (восток Черного, юг Азовского, шельф Охотского морей), показал, что в грунтовых толщах подверженных землетрясениями с $M = 5,5-7,5$ и интенсивностью (I) 8-9 баллов имеются слои глинистых и песчаных грунтов, подверженных разжижению [7,8,11,12]. В основном они представлены песками мелкими и пылеватыми средней плотности (пролив Невельского), песками мелкими рыхлыми, средней плотности, песками пылеватыми средней плотности и песками средней крупности средней плотности (северо-восточный шельф о. Сахалин, Кириновское ГКМ), супесью текучей со степенью плотности $I_d < 0,60$ (прикавказский шельф Черного моря), сапропелевыми осадками Черного моря (Туапсинский прогиб). В Азовском море значительно деформируются при сценарном землетрясении с $M = 7,5$, но не разжижаются ($PPR = 0,93-0,95$) глины текуче-пластичные, тяжелые и суглинки мягкопластичные, тяжелые пылеватые.

Наиболее детально проблема разжижаемости грунтов изучена на северо-восточном шельфе о. Сахалин [9,14]. В ходе изысканий для обустройства ряда крупнейших месторождений этого региона с участием компании Fugro (Нидерланды) были получены нижеследующие результаты.

В целом, приповерхностная толща северо-восточного шельфа о. Сахалин сложена грунтами склонных к разжижению. Они большей частью, представлены четвертичными песками пылеватыми, мелкими и средней крупности.

На площади Аркутун-Дагинского месторождения возможность разжижения грунта оценивалась посредством вычислений «коэффициентов циклического сопротивления» (CRR) и «коэффициентов циклического напряжения» (CSR) грунтов для землетрясений с $M_w = 7,5$. Выполненные расчёты показали, что грунты обладают высокой степенью сопротивления разжижению за исключением песчаных разновидностей грунтов в осадках палеодолин.

На Лунском месторождении широко распространены мелкие (преобладающая разновидность) и средние пески, залегающих на породах нутовской свиты. Наибольшую опасность здесь также представляют заполняющие палеодолины пески, которые разжижаются на глубину до 7 м.

В границах месторождения Чайво грунтовая толща мощностью 10 м сложена песками мелкими и средней крупности, плотными и очень плотными. Мощность слоя возможного разжижения песков в верхней части разреза менее 1 м.

На Кайганско-Васюканском участке вероятное разжижение донных осадков при землетрясениях не представляет опасности, так как полупогружная плавучая буровая платформа непосредственно с дном не взаимодействует. При разжижении грунтов якоря, удерживающие платформу, лишь погружаются глубже в грунт, что не представляет опасности. Однако, при разжижении грунтов может быть повреждено подводное оборудование устья скважины.

В районе месторождения Одопту (расположено в 9 км от Пильтунской косы, о. Сахалин) также были обнаружены грунты, склонные к разжижению при сейсмических нагрузках. Здесь, во время катастрофического Нефтегорского землетрясения ($M_w = 7,1$) в местах излияния разжиженных обводненных песчано-глинистых масс на Пильтунской косе образовались многочисленные «кратеры» диаметром до 25-30 м. Излияния разжиженных грунтов были приурочены также к сейсмогенным трещинам шириной 0,5 м [15]. В разрезе одного из «палеократеров» удалось установить несколько горизонтов погребенных почв, вероятно, свидетельствующих о неоднократных проявлениях разжижения во время ранее произошедших землетрясений. Несомненно, образование сейсмодеформаций обусловленных разжижением грунтов таких как «кратеры», крупные трещины представляет большую опасность для нефтегазпромысловых сооружений как на суше, так и в море.

Изучение разжижаемости грунтов Баренцева моря следует отнести к началу 90-х гг. XX в. с связи с планами освоения углеводородных ресурсов Штокмановского газоконденсатного месторождения (ШГКМ). В указанное время путем анализа и обобщения литературных и фондовых материалов по геологии, тектоники и сейсмичности Баренцевоморского региона ИМЦстройизыскания была выполнена предварительная оценка инженерно-сейсмических условий участка строительства ШГКМ, в т. ч. рассмотрены вопросы динамической устойчивости донных грунтов. Был сделан вывод, что при прогнозируемом расчетном сейсмическом воздействии (5-6 баллов по шкале MSK - 64) разжижение грунтов, слагающих участок строительства в интервале глубин 0-20 м (илы глинистые, глины текучепластичные, твердые) маловероятно.

Позже, на проектном этапе изыскания, после принятого решения об использовании на ШГКМ FPU (Floating Production Unit) в сочетании с технологией подводной добычи углеводородов проблемой разжижения грунтов занималось ООО «Питер Газ». Необходимо было оценить опасность погружения в грунты основания объектов подводного комплекса и незаглубленного трубопровода ШГКМ – губа Опасова (Кольский п-ов) в случае их разжижения.

Изучение грунтовых условий района размещения сооружений ПДК и трассы трубопровода включало: инженерно-геологическое бурение, пробоотбор, статическое зондирование, а также лабораторные исследования отложений. Работы выполнялись ОАО «АМИГЭ», ООО «Фугро Инжиниринг», Институт геоэкологии РАН и другими организациями.

Пробоотбор осуществлялся с помощью прямоточных гравитационных и вибрационных трубок с внутренним диаметром порядка 140 мм, длиной 6 м. Статическое зондирование проводилось в соответствии с ГОСТ 19912-2001 и ASTM D5778 в двух модификациях: в скважине и с поверхности морского дна. СPTU осуществлялось с использованием стандартных конусов (площадь зонда 10 см²,

угол 60°) или конусов большего диаметра (площадь 15см^2) – для более точного измерения параметров в «слабых» глинистых грунтах. Использованные зонды обеспечивали измерение: удельного сопротивления грунта под наконечником (конусом) зонда (q_c), удельного сопротивления грунта на участке боковой поверхности (муфте трения) зонда (f_s) и порового давления (U).

Изыскания показали, что на площади ШГКМ в верхней части разреза до глубины 10-18 м залегают (сверху вниз): илы глинистые и суглинки тяжелые с консистенцией от текучей до тугопластичной, пылеватые с прослоями и линзами песков и супеси.

На трассе трубопровода разрез сложен преимущественно илом глинистым, суглинком текучим с линзами песка мелкого, глиной текучепластичной (Рис. 1).



Рис. 1. Характерный вид морских верхнеплейстоцен-голоценовых отложений.
Ил переходящий в текучий суглинок.

В прибрежной и средней части трассы проектируемого трубопровода, наряду с глинистыми грунтами в верхней части разреза залегают супеси текучие и песчаные грунты мощностью около 2 м (Рис. 2).



Рис. 2. Характерный вид приповерхностного слоя супеси в интервале 0,0 -1,50 м.

Ближе к берегу супесь постепенно замещается песками мелкими и средней крупности. На участке берегового примыкания трубопровода преобладают пески средней крупности (ундаэлювий, прибрежный подтип, mv) с включением детрита раковин моллюсков, гальки (щебня) кристаллических пород (по полевому описанию до 25%) в придонной части разреза (Рис. 3).



Рис. 3. Характерный вид песчаных грунтов на участке берегового примыкания трубопровода.

Пески плотные и средней плотности. Гранулометрический состав характеризуется средним содержанием гравия – 6,2%, песчаных частиц – 92,7%, частиц пыли – 1,1%. Нормативные значения $W = 0,17-0,19$ д. е., $\rho = 1,88-1,99$ г/см³, $e = 0,43-0,69$, $C = 0-1$ кПа; $\phi = 36-39$ град. Модуль деформации

(E) в интервале давлений 0,1-0,4 МПа равен 25 МПа. Максимальная вскрытая мощность песков составляет 3 м.

В береговой зоне губы Опасова локально развиты и флювиогляциальные пески (fg). На ряде участков флювиогляциальные пески выходят на поверхность морского дна, но обычно перекрыты толщей голоценовых осадков. Мощность слоя песков 0,8-9,0 м. Представлены песками пылеватыми, плотными, с редкими включениями гальки и гравия (до 5%). Гранулометрический состав: песчаных частиц – 88,0%, частиц пыли 8,4%, глинистых – 3,5%. Нормативное значение $W=0,19$, $\rho=2,09$ г/см³, $e=0,53$. Характеристики прочности и деформируемости песка пылеватого определялись в условиях трехосного сжатия по схеме КД. Нормативные значения $C=0,0$ кПа, $\varphi=39$ град. E , в интервале нагрузок 0,2-0,3 МПа, составляет 40 МПа.

Оценка параметров, характеризующих возможность разжижения грунтов по результатам статического зондирования выполнена по методу Robertson (NCEER R&W 1998, 2009) [19,20]. Условия и принципы применения данного метода подробно рассмотрены в работах Е.А. Вознесенского [3-5]. Определяемый с помощью указанной методики и широко используемый в зарубежной практике фактор безопасности FS соответствует потенциалу разжижения F_L , используемому для оценки возможности разжижения грунтов согласно ГОСТ 25100-2011 и ГОСТ 56353-2015. В соответствии с ГОСТ 25100-2011 склонность грунтов к разжижению характеризуются таким образом: разжижаемые, если $F_L \leq 1,15$; неразжижаемые, если $F_L > 1,15$.

Кроме оценки динамической устойчивости донных грунтов на основании данных статического зондирования предварительная оценка динамической устойчивости грунтового основания морских сооружений может выполнена с использованием подхода, разработанного В.В.Штейнбергом [17]. Базовым понятием упомянутого подхода является сейсмический потенциал разжижения (Q). Экспериментально установлено, что возможность разжижения песчаных отложений определяется величиной $Q_{cr}=1300$ см/с². При превышении указанного значения $Q > Q_{cr}$ большой вероятностью возникает разжижение песчаных грунтов. Сейсмический потенциал разжижения связан с максимальным ускорением a_{max} и длительностью колебаний на уровне 0,5 от максимального ускорения ($t_{0.5}$) простым соотношением: $Q=a_{max} \times t_{0.5}$. Значения параметров, входящих в указанную формулу, могут быть рассчитаны на основе эмпирических соотношений, приведенных в работах [1,2] или путем расчета акселерограмм.

В работе [18] рекомендовано использовать иные, более низкие пороговые значения $Q_{cr}=1100$ и 850 см/с². Отмечается, что величина $Q_{cr}=1300$ см/с² – излишне оптимистичная оценка. Данный вывод подкреплен ссылкой на работу [16] в которой указано, что совместное воздействие горизонтальных и вертикальных составляющих сильных движений может значительно снизить порог сейсмических ускорений необходимых для возникновения разжижения. Предложена и обоснована более консервативная (пессимистическая) величина критического уровня $Q_{cr}=850$ см/с².

Исходными данными для косвенных оценок разжижения грунтов являлись материалы, которые были получены в ходе проведения инженерно-геологических изысканий разных лет на площади ШГКМ и на трассе проектируемого трубопровода. Параметры, необходимые для оценки фактора безопасности (M_{max} , a_{max}) были получены в рамках работ по уточнению исходной сейсмичности (УИС) и СМР. Согласно материалам УИС, сейсмическая интенсивность на площади ШГКМ и вдоль трассы трубопровода определяется исключительно местными землетрясениями. Все остальные активные внешние зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) (Брусилловская, Свальбардская, Новоземельская) не оказывают существенного влияния на сейсмичность площадок строительства ввиду их удаленности. Установлено, что на площади ШГКМ и на большей части трассы трубопровода $M_{max}=3,5-4,0$; $a_{max}=0,25-0,70$ м/с².

Опыт строительства морских трубопроводов свидетельствует, что наиболее сложным для строительства является участки их береговых примыканий [10]. Не является исключением в этом отношении береговое примыкание трубопровода ШГКМ – губа Опасова. К основным особенностям геологического строения указанного участка относится повсеместное распространение скальных пород высокой прочности – гранитов, гранодиоритов, гранито-гнейсов имеющих неровную кровлю и перекрытых чехлом песков повышенной мощности (возможен эффект резонансного усиления сейсмических колебаний). Здесь рассматриваемый трубопровод пересекает активный разлом («сброс Карпинского»). Выделенная по результатам УИС Мурманская зона ВОЗ имеет достаточно высокий сейсмический потенциал ($M_{max}=5,0 \pm 0,2$). Глубина гипоцентров ожидаемых мелкофокус-

ных землетрясений $h = 10$ км. Согласно данным СМР расчетная интенсивность землетрясения здесь может достигать 7,7 баллов для периода повторяемости $T=5000$ лет ($a_{max}=1,86$ м/с²).

Первый этап оценки склонности грунтов к разжижению заключался в определении индекса типа грунтов, величина которого характеризует их литологический состав. На втором этапе выполняется расчёт потенциала разжижения, с помощью которого и производится собственно оценка опасности разжижения грунта. В ходе обработки измеренных параметров зондирования было выполнено 130 расчётов индекса типа грунта и потенциала разжижения (Рис. 4).

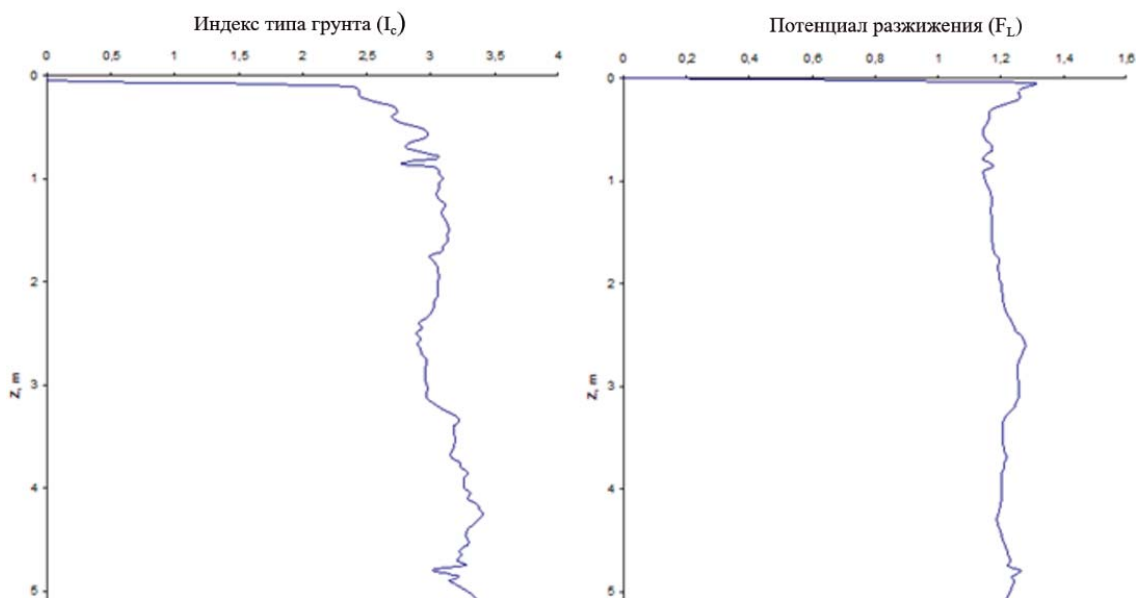


Рис. 4. Вариации индекса типа грунта (I_c) и потенциала разжижения (F_L) в точке зондирования СРТ по трассе трубопровода.

Разрез на участке проектируемых объектов ПДК был охарактеризован до глубин порядка 13 м, а на трассе трубопровода до 5 м.

Установлено, что в целом разрезы площади ШГКМ и большей части трассы трубопровода сложены глинистыми грунтами не склонными к разжижению. Проверка «китайских критериев разжижения» показала, что критерии не выполняются, так как содержание глинистых частиц мельче 0,005 для всех грунтов более 15%.

Сложными инженерно-геологическими условиями, как отмечалось выше, характеризуется береговое примыкание трубопровода (губа Опасова). Но и здесь, как показали расчеты, несмотря на наличие песчаных грунтов и повышенную сейсмичность, при сейсмических нагрузках характерных для Мурманской зоны ВОЗ разжижения песчаных грунта не происходит.

Таким образом, в результате выполненных исследований было установлено, что грунты, развитые в основании объектов на площади ШГКМ и на всем протяжении трубопровода от месторождения до Кольского п-ва не подвержены разжижению ($F_L > 1,15$). Тем не менее, считаем, что исследования склонности песчаных грунтов в губе Опасово нельзя считать завершенными. Тем более, что рассчитанный сейсмический потенциал разжижения (Q) здесь более критического Q_{cr} и составляет 1317 см/с². Но окончательный вывод по этой проблеме можно сделать только на основе данных, полученных путем лабораторного определения динамических свойств песчаных грунтов.

Литература

1. Аптикаев Ф.Ф. Сильные движения грунта при землетрясениях (сейсмические воздействия): дис. ... док. физ.-мат. наук. М.: ОИФЗ. 2001, 263с.
2. Аптикаев Ф.Ф., Копничев Ю.Ф. Учет механизма очага землетрясения при прогнозе параметров сильных движений // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, с. 822-825.
3. Вознесенский Е.А. Динамические испытания грунтов. Состояние вопроса и стандартизация // Инженерные изыскания. 2013. № 5. С. 20–26.

4. Вознесенский Е.А., Кушнарёва Е.С. Сейсмическая разжижаемость грунтов: инженерная оценка и классифицирование // Инженерная геология. 2012. № 2, с. 11–23.
5. Вознесенский Е.А., Коваленко В.Г., Кушнарёва Е.С., Фуникова В.В. Разжижение грунтов при циклических нагрузках. М.: Изд-во МГУ, 2005, 134 с.
6. Лаптева Т. И., Мансуров М. Н., Чумарин Д. Х., Конаева Л. А. Устойчивость морских трубопроводов, находящихся в донных грунтах, подверженных явлению разжижения // Газовая промышленность. 2011. № 13, с. 98-101.
7. Миролюк С. Г. Опыт сейсмического микрорайонирования морского и сухопутных участков трассы газопровода Джубга-Лазаревское-Сочи // ГеоИнжиниринг. 2011. № 3, с. 66–73.
8. Миролюк С. Г., Манжосов С. В., Ионов В. Ю. Оценка разжижаемости грунтов на площадках строительства подводных трубопроводов и добычного комплекса в районах северо-западного и северо-восточного шельфа о. Сахалин // Инженерные изыскания. 2011. № 6, с. 6–14.
9. Миролюк С. Г. Геологические опасности осваиваемых месторождений восточного шельфа о. Сахалин: идентификация и принципы картографирования // Вести газовой науки. 2015. № 2, с. 113–117.
10. Миролюк С. Г. Береговые примыкания морских газопроводов: выбор технологии строительства с учетом оценки геологических опасностей // Тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2015)», Москва, 28-29 октября 2015 года. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2015, с. 31.
11. Миролюк С. Г., Озмидов О. Р. Опыт оценки динамической устойчивости грунтов оснований объектов инфраструктуры морского порта Темрюк // Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций. М., 2015, с. 166-171.
12. Миролюк С. Г., Озмидов О. Р. Из опыта оценки сейсмической разжижаемости грунтов оснований якорей полупогружных буровых установок с помощью динамических трехосных испытаний // Инженерные изыскания. 2016. № 2, с. 18–23.
13. Миролюк С. Г., Кропоткин М. П. Возможный механизм и причины образования Утришских оползней суши и шельфа (полуостров Абрау) // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов (Опасные явления – II). ЮНЦ РАН Ростов-на-Дону, 2020, с. 52–57.
14. Новиков А. И., Новиков А. А., Голубин С. И., Савельев К. Н. Особенности проведения инженерных изысканий при определении потенциала разжижения грунтов в основании объектов морской добычи шельфа острова Сахалин (Россия) // Газовая промышленность. 2018. №. 3 (765), с. 18-25.
15. Оскорбин Л. С., Поплавский А. А., Стрельцов М. И. и др. Нефтегорское землетрясение 27 (28) мая 1995 г. (Mw= 7.1) // Землетрясения Северной Евразии в 1995 г., 2001. с. 170-182.
16. Чернов Ю. К., Чернов А. Ю. Сейсмогенное разжижение грунтов (предварительные оценки для некоторых участков территорий Дальнего Востока и Юга России) // Инженерная геология. 2007. №12. с. 34-44.
17. Штейнберг В.В. Колебания грунта при землетрясениях // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып.31.1990. с. 47-67.
18. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Антикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) // Вопросы инженерной сейсмологии. 1993. Вып. 34, с.5-94.
19. Robertson P.K. Performans Based Earthquake Design Using the CPT. Keynote Lecture., IS-Tokyo, June 2009.
20. Youd, T.L., Idriss, I.M., Robertson, P.K., et al. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering. Vol. 127. October 2001, pp. 817-833.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ПРИ ОЦЕНКЕ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ НА ПРИМЕРЕ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА

В.В. Романов

МГРИ, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, E-mail: roman_off@mail.ru

В 1960–1970-х годах из-за техногенного нарушения гидродинамического режима подземных вод на северо-западе г. Москвы произошла активизация карстово-суффозионных процессов, приведшая к провалам поверхности. Наиболее известны случаи провальных явлений в районе Хорошевского шоссе. Карст Московского региона относится к покрытому (русскому) типу. Карстующиеся известняки и доломиты московского, касимовского и гжельского ярусов перекрываются плотными юрскими глинами (келловейский и оксфордский ярусы), песками (волжский ярус юры, нижний и верхний мел) и четвертичными отложениями различного генезиса [1].

В течение континентального этапа развития, который продолжался с конца карбона до средней юры, сформировалась сеть речных долин, которые унаследовано развивались и в более поздние геологические эпохи. Одновременно с ними развивались и карстопроявления [1]. Карбонатные породы каменноугольного периода трещиноваты, а местами и сильно разрушены, встречаются зоны дезинтеграции, сложенные обломками известняков и доломитов и известковой мукой. Кровля каменноугольных пород сильно выветрелая, толщина элювиального плаща может достигать 1,5–3,0 м. В настоящее время карбонатные породы каменноугольной системы перекрыты толщей более поздних осадочных отложений и практически не подвержены карстовому процессу. Но сохранившиеся древние карстовые формы и зоны дробления, приуроченные к палеодолинам, все еще способны активизироваться в настоящее время. Изучение подземных карстовых полостей в г. Москве и Подмосковье сильно осложняется тем, что они недоступны для прямого изучения и выделяются при бурении скважин и проходке тоннелей метрополитена [2].

Геофизические методы позволяют проследить границы слоёв с различными физическими свойствами — сейсмическими, электрическими, радиоактивными и выделять локальные неоднородности в грунтовой толще. В городских условиях оптимально использование инженерной сейсморазведки, которая характеризуется достаточной глубинностью, высокой разрешающей способностью и высокой помехоустойчивостью [3].

Полевые работы проводятся вдоль профилей, расстановками длиной 46–94 м, состоящих из 24–48 пунктов приёма, с шагом 2 м. Для возбуждения поперечных сейсмических волн применяются удары кувалдой по касательной к земной поверхности перпендикулярно профилю, используется накопление с вычитанием сейсмограмм, полученных при разнонаправленных ударах. В холодное время года и при работе на твёрдом покрытии удаётся выделить отражённые волны от кровли юрских глин и каменноугольных карбонатных пород. При обработке данных сейсморазведки применяются такие процедуры, как попарное вычитание сейсмограмм, полученных по методике плюс/минус, накапливание сейсмограмм (вертикальное) суммирование, ввод геометрии в заголовки трасс, автоматическая регулировка усиления (окно – 100 мс), полосовая фильтрация трапецеидальным фильтром (0–10–60–70 Гц), минимально-фазовая предсказывающая деконволюция (длина оператора фильтра 60 мс, интервал предсказания 1–6 мс), многоканальная $f-k$ фильтрация, скоростной анализ, ввод кинематических поправок, верхний мьютинг, суммирование трасс по общим средним точками, повторное применение фильтрации к временному разрезу, глубинная миграция по Кирхгофу [5].

На получаемых глубинных разрезах прослеживались отражённые волны, выделялись зоны потери корреляции, уменьшения амплитуды и увеличения видимого периода, дифрагированные волны, приуроченные к областям повышенной трещиноватости и разуплотнения юрских и каменноугольных грунтов, так и непосредственно к скрытым проявлениями карстово-суффозионных процессов [3] (Рис. 1). Учитывая разрешающую способность метода отражённых волн, для проявления в волновом поле скрытая карстовая полость должна иметь высоту не менее 2–3 м и протяжённость не менее 10–15 м. Оценка глубинности метода, исходя из опыта выполнения работ в Московском регионе, до 40–50 м, однако этот параметр может значительно изменяться на конкретном объекте, как

в большую, так и в меньшую сторону. Также было установлено, что отражающие границы в толще скальных грунтов каменноугольного возраста наземной сейсморазведкой не выделяются, из-за их малой амплитуды и тонкослоистой структуры толщи грунтов касимовского яруса. Среди каменноугольных отложений хорошо выделяемые отражающие границы обычно совпадали с кровлями известняков мясницкой (бывшей измайловской), пресненской (бывшей перхуровской), перхуровской (бывшей ратмировской) свиты, также мячковской и подольской серии свит.

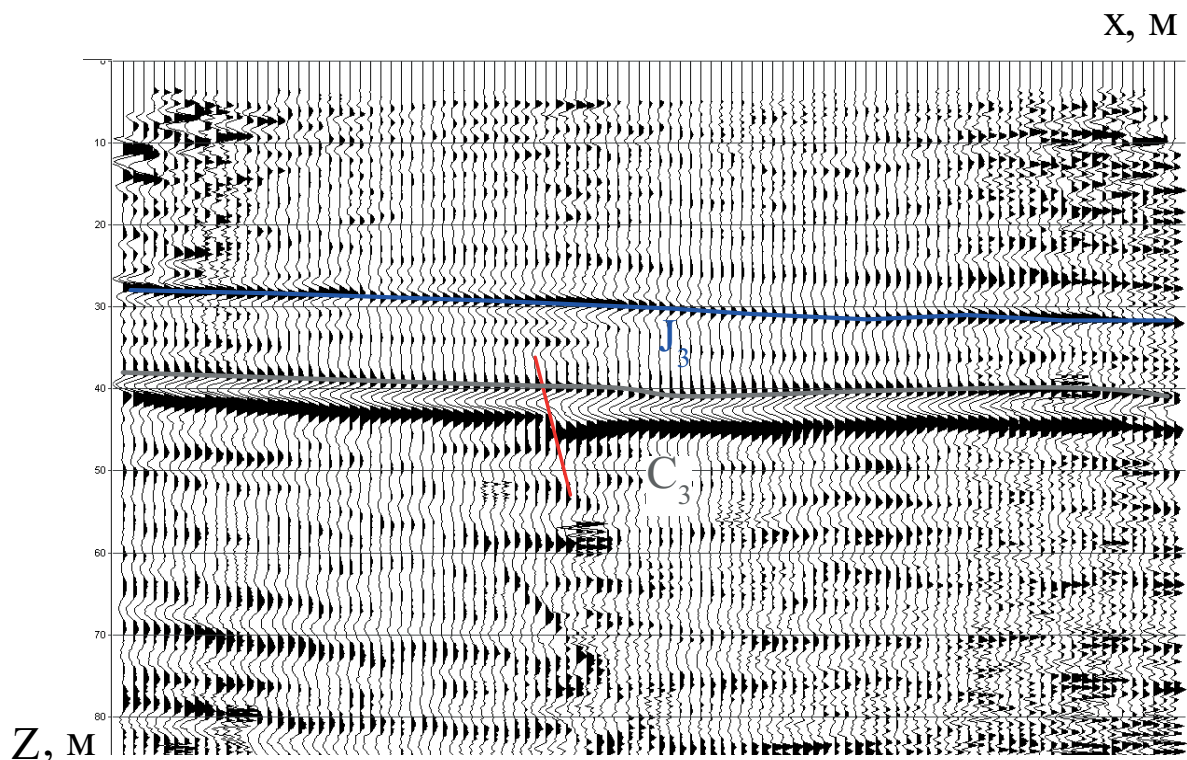


Рис. 1. Прослеживание кровли верхнеюрских глин и кровли известняков верхнего карбона по данным инженерной сейсморазведки. Красной линией показан тектонический разлом в кровле известняков.

В процессе интерпретации также определялись такие количественные параметры, как мощность юрских глин, глубина залегания кровли первого от поверхности слоя каменноугольных карбонатных пород, на качественном уровне — сохранность каменноугольных грунтов вблизи кровли. Следует отметить, что качество получаемых сейсмических изображений во многом определялось не глубиной обработки и тщательностью выбора параметров её процедур, а поверхностными условиями и уровнем техногенных помех при проведении полевых работ. Наиболее существенное влияние оказывало однородность физических свойств и толщина приповерхностного высокоскоростного слоя, сложенного асфальтом или бетоном, глубина и степень промерзания открытого грунта [4]. Даже в зимнее время промерзание открытого грунта может быть недостаточным или вовсе отсутствовать при значительной толщине снежного покрова или влияния действующих теплотрасс. Также на качестве сейсморазведочных данных отрицательно сказывается наличие развитой сети подземных коммуникаций и подвальных помещений, мозаичное строение техногенного покрытия. Заметно осложняет проведение полевых работ методами сейсморазведки шум от автотранспорта, движение по железной дороге, влияние метрополитена, выполнение строительных или буровых работ, иные источники вибрации. Заметное ослабление уровня перечисленных техногенных источников происходит в ночное время суток. Перечисленные факторы необходимо учитывать при проектировании сети профилей и выборе времени начала работ.

Выводы

Инженерная сейсморазведка позволяет прослеживать границы, связанные карстово-суффозионными процессами в Московском регионе, так и выделять скрытые крупные проявления карста.

При выполнении сейсморазведки следует чётко понимать возможности её методов в плане разрешающей способности, правильно выбирать положение профилей и время начала полевых работ.

Литература

1. Кутепов В. М., Козлякова И. В., Анисимова Н. Г. и др. Оценка карстовой и карстово-суффозионной опасности в проекте крупномасштабного геологического картирования г. Москвы // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. – 2011. – № 3. – С. 215-226.
2. Неходцев В.А., Гаршин Д.И., Пожидаев А.М. Строение и история развития пещеры Подмосковной. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2021;(5):109-123.
3. Романов В. В., Шнеерсон М. Б. Инженерная сейсморазведка методом отраженных волн в Москве // *Геофизика*. – 2018. – №. 6. – С. 75-81.
4. Скворцов А. Г. и др. Высокорастворимая сейсморазведка на поперечных волнах—опыт применения // *Galperin Readings 2011. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2011. – С. ср-276-00030*.
5. Gorelik G. et al. Application of CDP seismic reflection method in buried paleo-valley study // *Engineering and Mining Geophysics 2019 15th Conference and Exhibition. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. – Т. 2019. – №. 1. – С. 1-7*.

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ И СТРОЕНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ КАМЕННЫХ ЛАВИН – КЛЮЧ К ПОНИМАЮ МЕХАНИЗМА ИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

А.Л. Стром

ООО «Центр геодинамических исследований», г. Москва, 3-й Новомихалковский пер., 9.
E-mail: strom.alexandr@yandex.ru

Введение

Каменные лавины – один из наиболее опасных типов оползней в горных районах. Они отличаются исключительно высокой подвижностью, что, в сочетании с большим объемом смещающихся грунтов, определяет опасность, которую эти природные явления представляют для населения и различных объектов. Помимо этого они формируют крупные завальные плотины, прорыв которых может иметь еще более катастрофические последствия. Информация, важная и для понимания механизма столь высокой подвижностикаменных лавин, и для оценки устойчивости завальных плотин и особенностей их прорыва, без чего невозможны ни оценка опасности, ни корректное численное моделирование этих явлений, может быть получена при тщательном изучении строения и гранулометрического состава отложений каменных лавин, произошедших при обрушении склонов, сложенных породами разного состава и, что немаловажно, разного цвета. Такие наглядные примеры обнаружены в горных районах Центральной Азии и Северного Кавказа.

Сохранение взаимного положения литологических разностей, вовлеченных в обрушение, в отложениях каменных лавин

Сохранение исходных взаимоотношений между горными породами, слагающими область обрушения, в отложениях каменных лавин отмечалась многими исследователями [5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 26, 30]. При этом можно выделить два основных типа таких оползневых тел с различным относительным положением пород разного состава, изначально залегавших в верхней и в нижней части склона – «последовательным» (Рис. 1А) и «псевдослоистым» (Рис. 1В) [6, 29].

К первому типу могут быть отнесены, к примеру, некоторые каменные лавины в долине р. Гунт на Памире, произошедшие на склонах, сложенных метаморфическими и изверженными породами, у подножий которых залегали ледниковые отложения, представленные валунами с супесчано-дресвяным заполнителем. Моренный материал был вытолкнут этими оползнями как бульдозером и слагает внешние пояса оползневых тел, за которыми находятся основные их части, сложенные исключительно раздробленными обломками коренных пород. Еще более ярко этот эффект проявился у гигантской Кударинской каменной лавины на Памире (38.39° с.ш., 72.58° в.д.) отложения которой сложены несколькими «поясами», состоящими как из рыхлых ледниковых и аллювиальных отложений, так и из обломков раздробленных коренных пород разного состава.

Аналогичное сохранение последовательности отдельных слоев в оползневом теле, сложенном сильно раздробленными коренными породами, хорошо видно и у каменной лавины объемом около 18 миллионов м³ на южном склоне Тянь-Шаня в Синьцзяне (42.28° с.ш., 87.31° в.д.). Обрушившийся склон сложен разноцветными слоями метаморфизованных пород, каждый из которых отчетливо прослеживается в оползневом теле, сложенном сильно раздробленными обломками пород, вовлеченных в обрушение (Рис. 1).

Схожий «бульдозерный» эффект наблюдается и в отложениях Нижне-Кокомеренского оползня (41.736° с.ш., 74.0° с.ш.) в долине р. Кокомерен. Оползневое тело с «последовательной» структурой, лежащее на правом борту долины, было прорезано при строительстве автодороги и в этом разрезе последовательно обнажаются обломки пород, слагавших обрушившийся левобережный борт долины, в том числе материал осыпей, изначально накопившихся у его подножия [30].

Классическим примером «псевдослоистой» каменной лавины, у которой обломки пород, залегающих в основании склона, точнее, в основании оползневого цирка, образуют нижний «слой» оползневого тела, последовательно перекрываемый «слоями» обломков пород, изначально залегающих выше по склону (Рис. 1В), является Кокомеренская в Центральном Тянь-Шане объемом

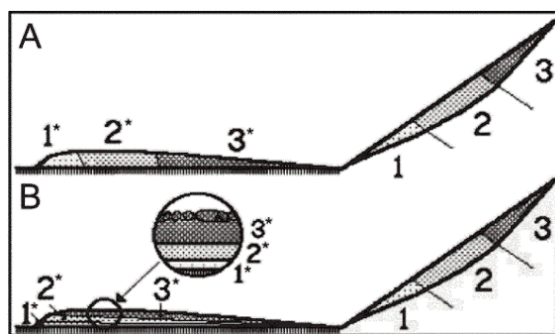


Рис. 1. Основные типы строения отложений каменных лавин, произошедших на склонах, сложенных породами разного состава. 1, 2, 3 – первоначальное положение пород на склоне; 1*, 2*, 3* – положение обломочных масс аналогичного состава в отложениях: А – с сохранением исходной последовательности; В – преобразование в псевдослоистую структуру.

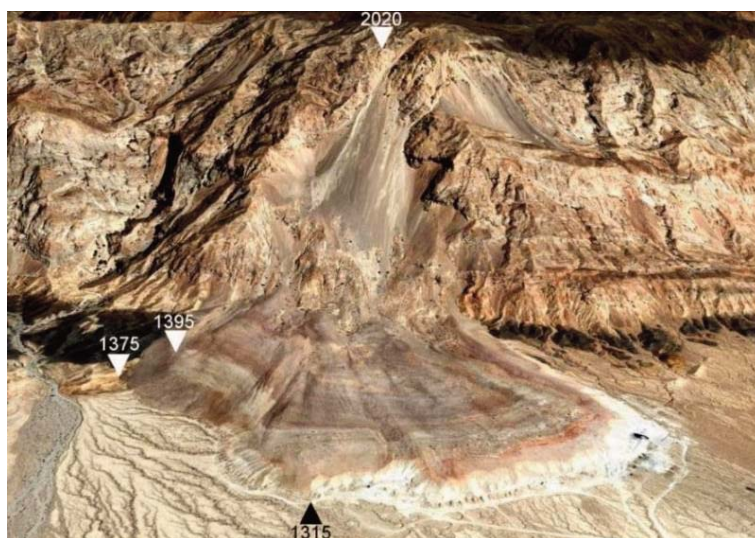


Рис. 2. Перспективное изображение Google Earth каменной лавины, в теле которой, сложенной раздробленным материалом, отчетливо прослеживаются отдельные слои, выделяемые в скальном массиве.

примерно 1,5 км³ (41.93° с.ш., 74.23° в.д.), сошедшая с левого борта долины р. Кокомерен высотой более 1600 м и образовавшая завальную плотину максимальной высотой около 400 м. Следует отметить, что эта каменная лавина двигалась сначала по поверхности широкой надпойменной террасы высотой в несколько десятков метров над уровнем реки (на момент образования оползня; в настоящее время река врезана еще примерно на 40 м глубже), затем обрушилась в русло, пересекла его и поднялась не менее чем на 250-300 м на противоположный правый борт долины (сейчас там сохранился лишь незначительный фрагмент верховой части завала). При этом, несмотря на столь сложную траекторию движения, в теле лавины прекрасно сохранилась исходная последовательность «слоев», сложенных обломками пород разного состава [6, 29, 30].

Другими яркими примерами такого «многослойного» строения оползневых тел являются Иньльчекская каменная лавина (42.16° с.ш., 79.457° в.д.) в восточной Киргизии, а также сложно-построенный Орнокский оползень (41.716° с.ш., 74.223° в.д.) в долине р. Кокомерен в центральной Киргизии, тыловая часть которого представляет собой колоссальный оползень вращения, а фронтальная – псевдослоистую каменную лавину [30].

Во всех описанных случаях обращает на себя внимание абсолютное отсутствие перемешивания – пакки, сложенные обломками пород разного литологического состава и, соответственно, разного цвета, имеют очень четкие границы.

Завершая этот раздел, отмечу, что сохранение того же взаимного положения обломков пород разных типов, какое эти породы имели в коренном залегании (под «коренным» в данном случае имеется в виду исходное положение и скальных и рыхлых пород до обрушения склона) и отсутствие признаков перемешивания обломков разного состава указывает на ламинарный характер «сухого течения» обло-

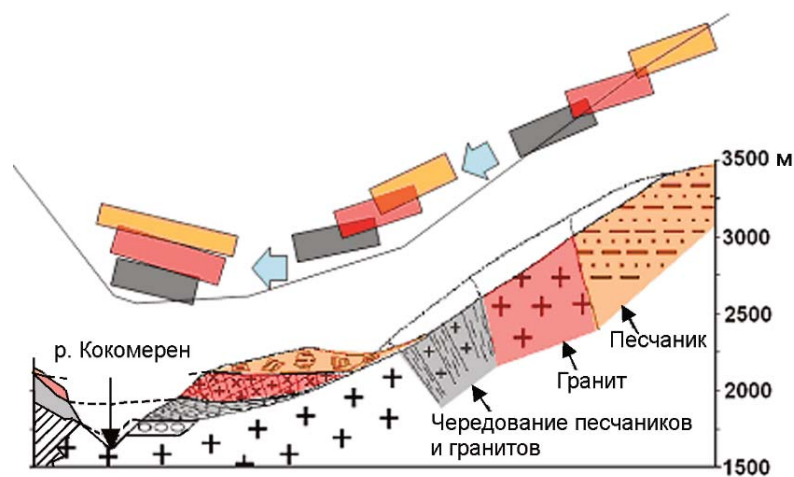


Рис. 3. Принципиальная схема строения и формирования тела Кокозеренской каменной лавины (из работы Hartvich et al., 2008).

мочной массы при движении каменных лавин. Это резко отличает их от селевых потоков, характеризующихся преимущественно турбулентным характером движения, в процессе которого материал сильно перемешивается, образуя достаточно однородную по составу обломочную массу [2, 3, 4].

Панцирная, основная и базальная фации отложений каменных лавин: особенности их гранулометрического состава

Еще одной характерной особенностью каменных лавин, проливающей свет на механизм их формирования и перемещения, является резкое различие гранулометрического состава отложений, образующих верхнюю (внешнюю) часть их тел – так называемую «панцирную фацию», и нижнюю или внутреннюю часть – «основную фацию». В ряде случаев удается выделить также «базальную фацию», представляющую собой раздробленные и перетертые породы зоны скольжения, часто с застрявшими в них фрагментами грунтов основания, по которому перемещалась каменная лавина [11, 19, 20] (Рис. 4).

Некоторые авторы выделяли также зоны более интенсивно перетертых пород во внутренней фации, рассматривая их как результат взаимного перемещения отдельных частей оползневого тела. В частности, такие зоны выделялись в отложениях грандиозного оползня Флимз в Швейцарии [12, 27]. Иногда удавалось обнаружить даже псевдотахилиты – следы плавления горных пород в основании или внутри крупных оползневых тел. Впервые такие породы, названные «фрикционит» (frictionite – от friction – трение) были выявлены в теле гигантского оползня Кёфельз в Австрийских Альпах [14]. Позднее были описаны и другие случаи, в частности в Гималаях [25, 31] и в Перу [25]. Подробный обзор особенностей внутреннего строения многочисленных оползневых тел сделан в работах [11, 30].

Необходимо подчеркнуть, что резкое различие в гранулометрическом составе панцирной и внутренней фаций отложений каменных лавин не может быть объяснено, как результат известного явления сепарации обломков при вибрационном воздействии на обломочную массу широкого гранулометрического состава, когда мелкозем постепенно проваливается вниз, а крупные обломки, вне зависимости от их изначального положения, «всплывают» вверх. Если бы имел место этот механизм, то среди панцирной фации отложений каменных лавин с «псевдослоистой» структурой присутствовали бы глыбы из разных «слоев», чего не наблюдается – панцирная фация практически всегда сложена глыбами из верхнего «слоя».

Мощность панцирной фации различна, но в ряде случаев видно, что крупноглыбовый покров, фактически, имеет толщину в одну глыбу. Наиболее отчетливо это проявилось в теле завальной плотины Большого Алмагинского озера (Рис. 5).

Контакт между панцирной и основной фациями обычно очень резкий, практически без какой-либо переходной зоны, причем и в тех случаях, когда обе фации образованы обломками пород одного и того же состава (Рис. 5,6).

И основная и, особенно, базальная фации отложений каменных лавин характеризуются чрезвычайно высокой степенью дробления материала, слагающих эти части оползневых тел (Рис. 7),

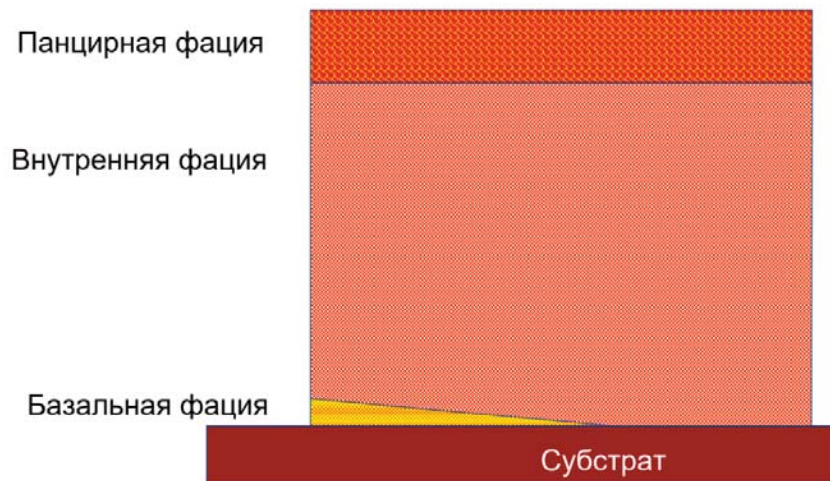


Рис. 4. Принципиальная схема внутреннего строения отложений каменных лавин.



Рис. 5. Небольшой карьер в центральной части завальной плотины Большого Алматинского озера в борту которого отчетливо видно, что крупно-глыбовая панцирная фация отложений имеет мощность, фактически, «в одну глыбу» и подстилается интенсивно раздробленным щебнем того же состава без видимой переходной зоны.

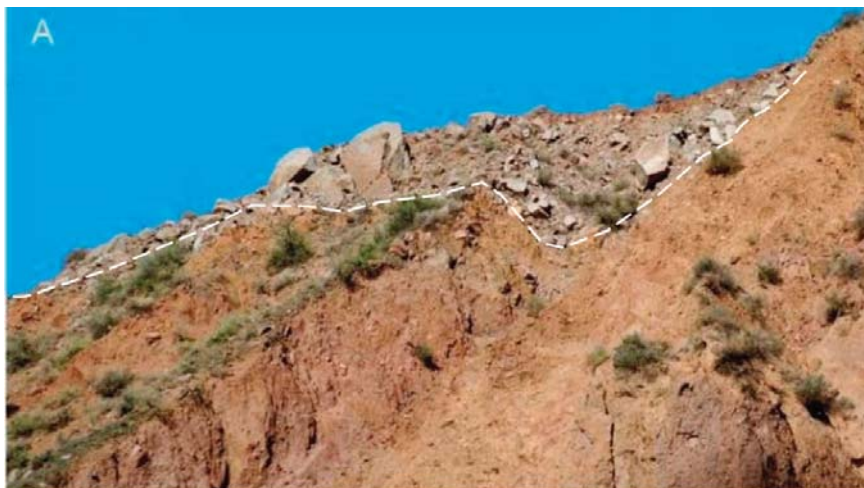


Рис. 6. Отчетливый контакт между крупно-глыбовой панцирной фацией и интенсивно раздробленной внутренней фацией в теле Нижне-Аральской каменной лавины, сложенной раздробленными гранитами.

причем вне зависимости от прочности пород. Более того, создается впечатление, впрочем, пока не подкрепленное статистическими данными, что более прочные породы (палеозойские и протерозойские граниты, гнейсы, мраморизованные известняки) дробятся более интенсивно, чем сравнительно малопрочные неогеновые конгломераты, разрушающиеся до гальки в супесчано-дресвяном заполнителе. По некоторым данным [1, 28] степень дробления доходит до частиц субмикронного размера, что было подтверждено и экспериментами на приборах кольцевого сдвига, выполненными в Государственной лаборатории по предупреждению стихийных бедствий Технологического уни-

верситета в г. Чэнду, КНР [22, 23], что указывает на возможность образования частиц столь малых размеров именно в результате механического дробления.

И столь интенсивное дробление, проявляющееся во всем объеме основной фации каменной лавины, и резкий контраст гранулометрических составов панцирной и основной фаций, указывают на резкую смену характера напряженно-деформированного состояния при переходе от внешних к внутренним частям тел каменных лавин. Можно предполагать, что крупные обломки и глыбы, слагающие панцирную фацию, двигаются пассивно, как льдины на поверхности потока [11]. Основные же деформационные процессы развиваются в толще основной фации, где возникают кратковременные перенапряженные участки (силовые цепочки) [8, 9, 26], что и приводит к прогрессирующему разрушению обломков.

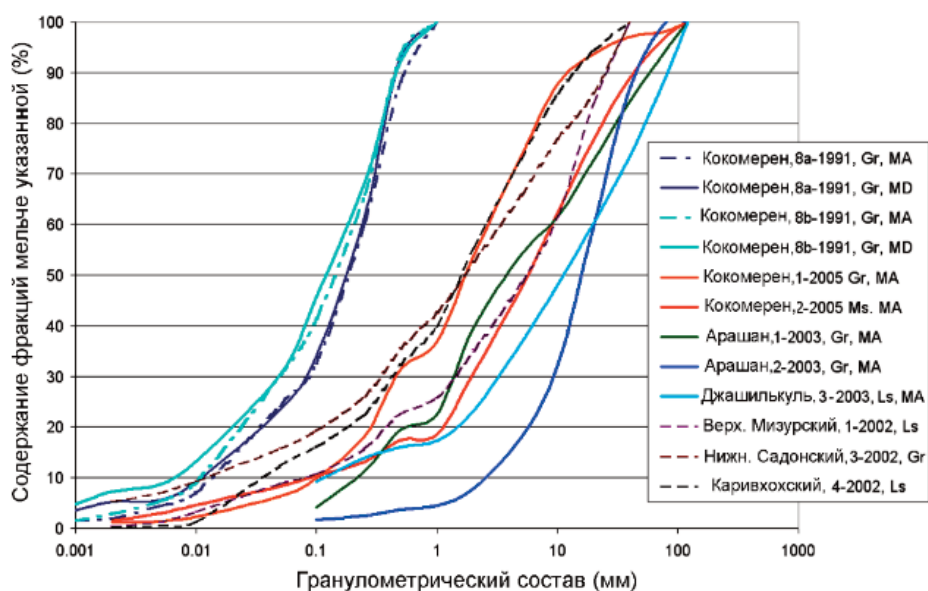


Рис. 7. Графики гранулометрического и микроагрегатного состава проб, отобранных в отложениях ряда каменных лавин Центральной Азии и Северного Кавказа. Указаны их названия, номера и год отбора проб. Графики с индексом МА – микроагрегатный состав (проба готовилась путем взбалтывания в воде); графики с индексом MD – грансостав максимальной дисперсности (проба кипятилась с добавлением пирофосфата натрия). Состав пород: (G - граниты, Ls - известняки, Ms – метаморфизованные песчаники).

Выводы

Приведенные примеры показывают, что изучение строения и гранулометрического состава отложений каменных лавин дает информацию, позволяющую объективно и обоснованно судить о процессах, протекающих в ходе их формирования и движения. Массовое опробывание с отбором проб из разных частей тел глубоко эродированных тел каменных лавин, как по вертикали (из верхних, средних базальных частей разреза), так и по направлению их перемещения (из тыловых, средних и фронтальных частей), а также из тел каменных лавин, сложенных обломками пород разного состава и прочности, позволит перейти к количественной оценке закономерностей развития этих процессов и к лучшему пониманию их природы.

Такие исследования имеют не только научное, но и прикладное значение. Они дадут исходную информацию, важную как для прогнозирования размеров и формы областей поражения у подножий высоких горных склонов, где предполагаются крупномасштабные обрушения, так и для оценки устойчивости завальных плотин и прогнозирования характера их разрушения и прорыва [13].

Литература

1. Адушкин В.В., Перник Л.М., Попель С.И., Стром А.Л., Шишаева А.С. Формирование частиц нано- и микродиапазонов при обрушении скальных склонов. Сб. научных трудов: Нано- и микромасштабные частицы в геофизических процессах. М.2006. Изд. ИДГРАН

2. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Ленинград :Гидрометеоиздат, 1977.
3. Степанов Б.С., Степанова Т.С. Механика селей. М., Гидрометеоиздат, 1991.
4. Степанов Б.С. Яфязова Р.К. Селевые явления юго-восточного Казахстана. т. 3. Селевые процессы и селетехнические сооружения. Алматы, 2014.
5. Стром А.Л. Формирование структуры отложений крупных скальных оползней// Геоэкология, Инженерная Геология, Гидрогеология, Геокриология. 1994.№ 5, с. 64-77
6. Стром А.Л. Морфология и внутреннее строение крупных скальных оползней как индикаторы механизмов их формирования // Доклады Академии Наук. 1999. т. 369. № 1, с. 89-91
7. Abdрахmatov, K., and Strom, A. Dissected rockslide and rock avalanche deposits; Tien Shan Kyrgyzstan. In: Evans, S.G.; ScarasciaMugnozza, G.; Strom, A.; Hermanns, R.L. (Eds.) Landslides from Massive Rock Slope Failure. NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, Springer.2006.Vol. 49, pp. 551-572
8. Davies, T.R. and McSaveney, M.J.Runout of dry granular avalanches // Can. Geotechnical J. 1999.36, pp. 313-320
9. Davies T.R.H., Reznichenko N.V., McSaveney M.J.Energy Budget for a rock avalanche: fate of fracture surface energy // Landslides. 2020.17, pp. 3-13
10. Dufresne, A., Davies, T.R., and McSaveney, M.J. Influence of runout-path material on emplacement of the Round Top rock avalanche, New Zealand //Earth Surf. Process. Landf. 2009.35, pp. 190–201
11. Dufresne, A., Bösmeier, A., and Prager, C. Sedimentology of rock avalanche deposits – Case study and review //Earth-Science Reviews.2016.163, pp. 234–259
12. Dufresne, A., Dunning, S.A. Process dependence of grain size distributions in rock avalanche deposits //Landslides. 2017. 14, pp. 1555–1563
13. Dunning, S.A., and Armitage, P.J. The Grain-Size Distribution of Rock-Avalanche Deposits: Implications for Natural Dam Stability. In: Evans SG, Hermanns R, Scarascia-Mugnozza G, Strom AL (eds.), Natural and Artificial Rockslide Dams. Lecture Notes in Earth Sciences 2011. 133, pp. 479-498
14. Erismann, T.H. Mechanisms of large landslides, Rock Mechanics 1979.12, pp. 15–46.
15. Heim, A.Bergsturz und Menschenleben. Fretz and Wasmuth, Zürich. 1932
16. Heuberger H., Masch L., Preuss E., Schreker A. Quaternary landslides and rock fusion in Central Nepal and the Tyrolean Alps. Mt Res Dev 1984.4. pp. 345–362
17. Hewitt, K. Catastrophic landslide deposits in the Karakoram Himalaya // Science 1988.242, pp. 64-67
18. Hewitt, K.Quaternary moraines vs catastrophic rock avalanches in the Karakoram Himalaya, Northern Pakistan, Quaternary Research 1999. 51, pp. 220–237
19. Hewitt, K. Styles of rock avalanche depositional complex in very rugged terrain, Karakoram Himalaya, Pakistan. In Evans S.G. (ed.) Catastrophic Landslides: effects, occurrence and mechanisms, Reviews in Engineering Geology.2002. 15, pp. 345–378
20. Hewitt, K. Rock Avalanches with Complex Run Out and Emplacement, Karakoram Himalaya, Inner Asia. In: Evans, S.G.; ScarasciaMugnozza, G.; Strom, A.; Hermanns, R.L. (Eds.) Landslides from Massive Rock Slope Failure. NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, Springer, 2006,Vol. 49, pp. 521–550
21. Hewitt, K., Clague, J.J., and Orwin, J.F. Legacies of catastrophic rock slope failures in mountain landscapes //Earth-Science Review. 2008.87, pp. 1–38
22. Hu, W., Xu, Q., Wang, G., Scaringi, G., Mcsaveney, M., &Hicher, P.-Y. Shear resistance variations in experimentally sheared mudstone granules: A possible shear-thinning and thixotropic mechanism // Geophysical Research Letters. 2017.44, pp. 11040–11050
23. Hu, W.,McSaveney, M. J., Xu,Q., Scaringi, G., Huang, R., Zheng, Y. S.Crushed rock flows like peanut butter // Journal of Geophysical Research. Under review
24. Johnson, B. Blackhawk landslide, California, U.S.A, in B. Voight (Ed.), Rockslides and Avalanches, Vol. 1, Natural Phenomena, Amsterdam, Elsevier.1978,pp. 481–504
25. Legros F, Cantagrel J-M., Devouard B.Pseudotachylyte (Frictionite) at the Base of the Arequipa Volcanic Landslide Deposit (Peru): Implications for Emplacement Mechanisms //The Journal of Geology.2000. 108(5), pp. 601–611
26. McSaveney, M.J., and Davies, T.R.H. Rapid rock-mass flow with dynamic fragmentation: inferences from the morphology and internal structure of rockslides and rock avalanches. In: Evans SG, ScarasciaMugnozza G, Strom A, Hermanns RL (eds.) Landslides from massive rock slope failure. NATO science series: IV: earth and environmental sciences.2006. Vol 49. Springer, Heidelberg, pp. 285–304.

27. Pollet, N., Cojean, R., Couture, R., Schneider, J-L., Strom, A.L., Voirin, C., and Wassmer P. A. slab-on-slab model for the Flims rockslide (Swiss Alps) // *Can. Geotech. J.* 2005.42, pp. 587–600
28. Reznichenko, N.V., Davies, T.R.H., Shulmeister, J., Larsen, S.H. A new technique for identifying rock-avalanche-sourced sediment in moraines and some palaeoclimatic implications // *Geology*, 2012.40, No 4, pp. 319–322
29. Strom, A.L. Morphology and internal structure of rockslides and rock avalanches: grounds and constraints for their modelling. In: Evans, S.G.; Scarascia Mugnozza, G.; Strom, A.; Hermanns, R.L. (Eds.) *Landslides from Massive Rock Slope Failure. NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences*, 2006. Vol. 49, pp. 305–328
30. Strom A., Abdrakhmatov K. 2018. *Rockslides and rock avalanches of Central Asia: distribution, morphology, and internal structure*. Elsevier, Netherlands, UK, USA. ISBN: 978-0-12-803204-6
31. Weidinger, J.T., Korup O. Frictionite as evidence for a large Late Quaternary rockslide near Kanchenjunga, Sikkim Himalayas, India—Implications for extreme events in mountain relief destruction // *Geomorphology*, 2009, 103(1), pp. 57–65

ПОЛЗУЧЕСТЬ ОТВАЛОВ НА ВЫСОКОГОРНОМ РУДНИКЕ КУМТОР

И.А. Торгоев

Институт геомеханики и освоения недр НАН Кыргызской Республики
720053, г. Бишкек, ул.Медерова 98. E-mail: isakbektor@mail.ru

Высокогорный рудник по добыче золота Кумтор расположен в нивально-гляциальном поясе Тянь-Шаня на высотах 3600-4400 м над уровнем моря. Суровые климатические условия района, наличие активных горных ледников и многолетней (вечной) мерзлоты, повышенная сейсмическая активность, а также происходящее изменение климата в сочетании с мощным техногенным пресингом на ледники и многолетнюю мерзлоту вызывают активное развитие на Кумторе опасных гравитационных и криогенных процессов.

К гравитационным смещениям масс на высокогорном руднике Кумтор относятся оползни на отвалах пустых пород и льда (Рис. 1), со временем трансформировавшиеся в грандиозные «техногенные каменные глетчеры» (ТКГ).



Рис. 1. Панорама ледников, оползающих отвалов и техногенных каменных глетчеров в районе основных объектов высокогорного рудника Кумтор.

По состоянию на конец 2020 г. на руднике Кумтор было разработано в карьерах и перемещено в отвалы свыше 2,0 млрд. тонн вскрышных и пустых пород, а также около 300 млн. м³ глетчерного льда [1]. Исторически сложилось так, что отвалы пустых пород и льда по сиюминутным экономическим соображениям формировались в непосредственной близости от карьеров, на активных ледниках Лысый, Давыдова и Сары-Тор (Рис. 1).

Отсыпка отвальных пород велась на руднике в основном на наклонные поверхности движущихся ледников и прилегающих склонов, которые сложены с поверхности мощными (до 40 м) моренными отложениями, представленными высокольдистыми многолетнемерзлыми породами со средней температурой около $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1].

Пустые породы, отсыпаемые в отвалы, представлены филлитами и в меньшей степени, рассланцованными филлитоподобными конгломератами. В табл. 1 приведены основные физико-механические и прочностные свойства горных пород и льда в отвалах.

Гранулометрический состав отсыпаемой породы в общем случае предопределяется её физико-механическими свойствами и структурными особенностями, а также параметрами буровзрывных работ. После взрывания образуется раздробленная породная масса, размеры отдельных кусков которой по фракционному составу изменяются в широких пределах: от 1-2 до 1000-1200 мм (нега-

<i>Таблица 1.</i>					
Физико-механические и прочностные характеристики горных пород и льда в отвалах					
Материал отвала	Объёмный вес (кг/м ³)	Модуль Юнга (кгс/см ²)	Коэффициент Пуассона	Сцепление (кгс/см ²)	Угол внутреннего трения (град)
Отвальные породы	1900	75000	0,32	0,15*	37°
Лёд	870	91000	0,31	0	30°

* Сцепление породы в момент отсыпки рано 0 и 0.15 кгс/см² через 2-3 недели после отсыпки.

<i>Таблица 2.</i>								
Фракционный состав дроблённой массы горных пород								
Класс	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Размер (мм)	0-5	5-10	10-25	25-50	50-100	100-150	150-250	>250
(%)	11,3	7,8	12,0	14,0	17,0	13,5	14,1	10,3

бариты). Вся породная масса условно разделена по крупности на восемь классов (табл.2), при этом преимущественные размеры обломков вмещающих пород составляют 3-10 см.

Породы и лёд, отсыпаемые в отвалы большегрузными самосвалами, первоначально представляют собой несвязную сыпучую массу, которая попадает на склон или на ледник в максимально разрыхленном состоянии. В процессе отсыпки отвалов, которая ведётся круглосуточно, в том числе в зимний период, происходит уплотнение (оседание) отвальной массы, увеличение её связанности (сцепления) внутри отвала, в том числе за счёт замерзания ледово-каменной массы. Десятки скважин, пробуренных через отвалы, в том числе для определения мощности льда и моренных отложений под отвалами, показали, что отвалы находятся в замёрзшем состоянии. Данные термометрических измерений в этих скважинах свидетельствуют о том, что температура внутри отвалов изменяется от -0,2 до -0,6°С.

С самого начала эксплуатации рудника в 1995 г. осуществлялось совместное складирование в отвалах пустых пород и глетчерного льда, удаляемого при вскрыше и в пределах контуров карьеров. Основной чертой строения промерзающих отвалов является щебенисто-глыбовый состав каменного материала, переслаивающегося со льдом (Рис. 2).

Из-за неразумного отвалообразования на грандиозных отвалах, отсыпанных в бассейне ледника Давыдова, в марте 2013 г. возник гигантский «техногенный оползень» объёмом свыше 700 млн. м³, который начал перемещаться в 2010 г. вниз по долине ледника Давыдова (руслу р. Чон-Сарытор). По результатам инженерно-геологических изысканий и геотехнических исследований было установлено, что ледово-каменная масса отвалов смещается по наклонной поверхности (12-16°) высокольдистых многолетнемерзлых пород, залегающих под слоем донной морены ледника Давыдова (Рис. 2). Сеть инклинометров, установленная на теле движущихся отвалов, позволила выявить постоянный сдвиг на глубине 45 м ниже первоначальной дневной поверхности. Величина сцепления моренного материала на глубинах от 19 до 33 м нарастала от 85.0 до 105.0 кПа, угол внутреннего трения - от 40° до 42°, число пластичности уменьшалось от 11.0 до 8.4.

Согласно данным мониторинга за период 2012-2013 гг. язык ледника техногенного оползня продвинулся вниз по долине на расстояние 1,0 км от конечной морены ледника Давыдова. В результате такого смещения был разрушен ряд крупных рудничных объектов с экономическим ущербом свыше 100 млн. дол. США [1-3]. Из-за непрекращающегося смещения оползня вниз по долине р. Чон-Сарытор пришлось перенести вахтовый посёлок, электрическую подстанцию, метеостанцию и прочие объекты инфраструктуры рудника.

Почти по аналогичному сценарию 1 декабря 2019 г. на руднике Кумтор произошло обрушение и оползание отвалов, отсыпанных в бассейне ледника Лысый (Рис. 3). В результате обрушения и

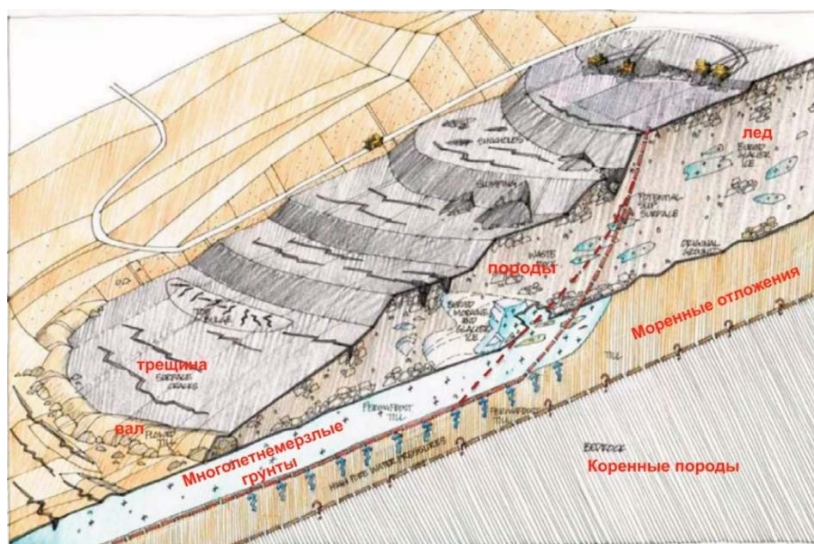


Рис. 2. Схематическое представление о механизме смещения каменно-ледовых отвалов в долине ледника Давыдова по наклонной поверхности моренных отложений и многолетнемерзлых пород.

подвижки отвалов объёмом свыше 30 млн. м³ погибли два сотрудника КГК, тела которых под мощным завалом обнаружить не удалось.



Рис. 3. Отвалы и техногенный каменный глетчер в бассейне ледника Лысый: а) общий вид ТКГ и каменно-ледовых отвалов; б) трещины на новых отвалах СВО-3, отсыпанных непосредственно на склоне.

Долинный ледник Лысый, расположенный между ледниками Петрова и Давыдова (Рис. 1,3), стал первым ледником, испытавшим прямое воздействие добычи руды (техногенный прессинг) на руднике Кумтор [1]. Сначала в верхней части (западном цирке) ледника производилось изъятие и удаление льда на участке в границах Центрального карьера, а затем на периферии этого глетчера, на западном борту долины была начата отсыпка отвалов пустых пород вперемешку с глетчерным льдом.

Исследования, проведённые на леднике Лысый в 1984–1985 гг. гляциологами Института географии РАН, показали, что лёд в толще этого глетчера был приморожен к ложу ледника (к подстилающим горным породам и донной морене). С точки зрения динамики и кинематики движения льда и отсыпанных на леднике Лысый отвалов это означает, что основным фактором их смещения вниз является относительно медленное пластическое течение льда. Уклон ложа долинного ледника Лысый составляет 4°. По данным гляциологов в период с 1932 по 2003 гг. ледник под влиянием потепления климата постепенно отступал от конечной морены со средней скоростью 10,3 м/год [1].

Исторически самые первые отвалы пород №3,4 начали формироваться в сентябре 1996 г. на западном борту долины ручья Лысый. Отсыпка вскрышных и пустых пород производилась сначала на наклонную поверхность склона, а затем и на поверхность верхней части (цирка) ледника. К 1999 г. большая часть внутреннего цирка ледника Лысый, включая зону аккумуляции льда, была покрыта пустой породой.

В 1999–2002 гг. по мере нарастания объёма отвалов эти скопления горных пород и льда, трансформировались в ТКГ «Лысый» и начали смещаться вниз по склону, в сторону тальвега ледниковой долины (Рис. 1,3,5).

В 2013 г. начинается интенсивная отсыпка новых отвалов на западном борту долины р. Лысый, непосредственно на горном склоне (Рис. 3б). Причём отсыпка новых Северо-Восточных отвалов №3 (СВО-3) осуществлялась отрицательно зарекомендовавшим себя способом «сверху-вниз» и без предварительной подготовки основания отвалов [1]. Из-за того, что отвалы размещались на крутых склонах, сложенных мелкозернистыми мореными грунтами с высоким содержанием льда, они с самого начала смещались по наклонным поверхностям в сторону русла ручья Лысый (Рис. 3б). По данным мониторинга смещения породных отвалов, проводимого геотехнической службой КГК, средняя скорость движения новых отвалов в октябре 2013 г. достигала временами 1,0 м/сут.

Таким образом, начиная с 2013 г. в бассейне ледника Лысый возникла ситуация, характеризующаяся наличием двух различных групп отвалов. Первая группа включает старые так называемые «исторические отвалы», которые по мере нарастания объёма отсыпаемых пород и глетчерного льда трансформировались в техногенный каменный глетчер «Лысый». Средняя мощность ТКГ в октябре 2017 г. составляла 40 м, варьируя в интервале от 41 до 48 м. Этот ТКГ сместился в основном по тальвегу долины ручья Лысый в северо-западном направлении, в сторону русла р. Кумтор с относительно постоянной скоростью 0,22 м/сут [3]. Вторая группа включала упомянутые выше отвалы СВО-3, которые отсыпались на западном борту долины ручья Лысый, в приводораздельной части крутого склона (Рис. 3б). Движение обеих групп отвалов измерялось по поверхностным точкам мониторинга с помощью автоматического лазерного сканирования. Как и в случае движения ТКГ, точки мониторинга на смещающихся отвалах СВО-3 смещались по падению склона. Скорости смещения определялись крутизной поверхности склона, варьируя в интервале от 0,24 до 0,55 м/сут с более высокими значениями скорости на более крутых верхних участках склона. Измерения с помощью инклинометров показывали, что новые отвалы смещались в направлении к руслу ручья Лысый по поверхности ледяной морены со скоростью 0,76 м/сут [4].

За период с 1996 по 2019 гг. в отвалах, размещённых в бассейне ледника Лысый, было отсыпано свыше 105 млн. м³ горных пород и почти 50 млн. м³ глетчерного льда, что, в конце концов, и стало причиной обрушения отвалов и сильной подвижки ТКГ Лысый, произошедших 1 декабря 2019 г.

Следует отметить, что новые отвалы (СВО-3) отсыпались на крутом склоне крутизной 15°-20°, сложенном с поверхности до глубины 1,7-2,5 м мореными отложениями, представляющими собой слой слабых мелкозернистых иногда щебнистых грунтов с содержанием льда от 10-15% до 35%. Этот слой слабых грунтов совпадает по мощности с сезонно-талым слоем (СТС), залегающим на многолетнемерзлых скальных породах. В замороженном состоянии мелкозернистые грунты, покрывающие склоны, на которых отсыпаются отвалы, устойчивы при низких температурах и весьма нестабильны при оттаивании и под нагрузкой, что ведёт к потере их прочности, деформации и просадкам. По этой причине формирование отвалов на склонах методом отсыпки пород на поверхность крутого склона сверху-вниз, неизбежно связано с риском возможных смещений отвалов по падению склона. Как свидетельствует практика отсыпки отвалов на склонах Кумтора, со временем они смещаются вниз по плоскости скольжения, которая приурочена к кровле многолетнемерзлых коренных пород.

Согласно данным мониторинга смещения отвалов весной 2019 г. было зафиксировано постепенное увеличение средней скорости смещения отвалов СВО-3 от 0,2 м/сут в марте до 0,63 м/сут в ноябре.

На Рис. 4 представлены графики изменения скорости смещения отвалов СВО-3 по двум точкам мониторинга wd3-995 и wd3-947, закреплённых соответственно в средней и нижней частях отвалов, на протяжении ноября месяца 2019 г., предшествующего обрушению отвалов 1 декабря 2019 г.

Результаты ежедневного мониторинга, представленные в графическом виде на Рис. 4, свидетельствуют об устойчивой тенденции значительного нарастания скорости смещения в средней части (СВО-3) (точка wd3-995) от 0,51 м/сут (31.10.19) до значения 1,75 м/сут (29.11.19). В точке wd3-947, установленной в зоне контакта нижней части отвала СВО-3 с ТКГ, изменение скорости смещения едва заметно, однако налицо тенденция её постепенного увеличения, особенно нарастающего за несколько дней до обрушения, когда скорость смещения возросла от 0,05 до 0,25 м/сутки.

Анализ космоснимков высокого разрешения позволил установить, что вначале произошло оползание отсыпанных на высотах 3970 м и 3940 м отвалов СВО-3 вниз по склону, в сторону ручья Лысый (Рис. 5).



Рис. 4. Характер изменения скорости смещения для разных частей отвалов Лысый в ноябре 2019 г. - до их обрушения.

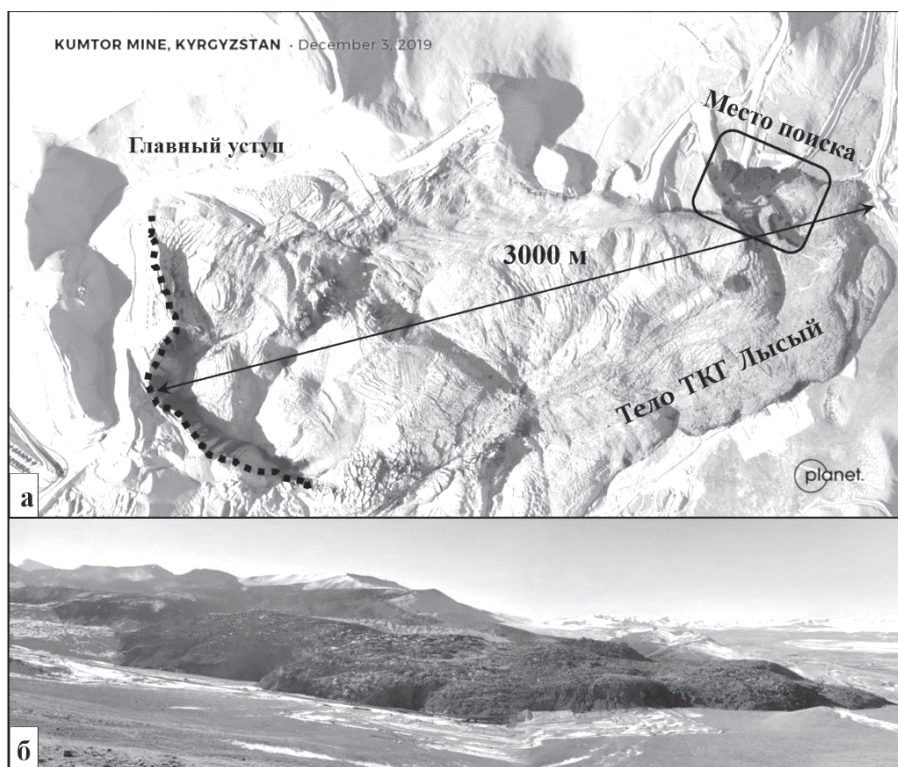


Рис. 5. Общий вид оползня, возникшего на каменно-ледовых отвалах в бассейне ледника Лысый 1 декабря 2019 г.: а) космоснимок высокого разрешения Planet от 03.12.20; б) фото оползшей массы ТКГ «Лысый».

Обследование, выполненное сразу после обрушения отвалов, подтвердило, что оползание отвалов СВО-3 произошло в результате скольжения по кровле высокольдистых многолетнемёрзлых пород, залегающих под слоем моренных отложений, который был обнаружен в нижней части разреза.

Вслед за оползанием отвалов СВО-3 из-за потери упора последовало обрушение мощных ледово-каменных отвалов в верхней части ТКГ на отметке 4116 м. При обрушении этой части отвалов обнажилась глубокая стенка отрыва (Рис. 5а) высотой более 50 м с цилиндрической поверхностью и запрокидыванием головной части смещённых масс. Обследование этой части оползня показало, что плоскость сдвига и скольжения в верхней части проходит внутри отвала, а не на контакте основания отвала со склоном. Отмеченные особенности плоскости сдвига и скольжения может свидетельствовать

о том, что смещение возникло также из-за деформации ползучести, обусловленной большим содержанием льда внутри верхней слоистой части отвала, на которой постоянно отсыпался лёд в так называемом «ледовом отвале». Отгрузка льда производилась вперемешку со слоями пустых пород, которые отсыпались поверх льда для предотвращения пробуксовки самосвалов и бульдозеров.

Наконец, в результате мощной пригрузки тела ТКГ оползшими массами отвалов СВО-3, а также ледово-каменным материалом из его верхней части, произошла подвижка ТКГ (старых отвалов), фронтальная часть которого (язык) продвинулся на 500-550 м. В языковой части ТКГ образовались дугообразные валы, характерные для движущихся каменных глетчеров [1]. Следует отметить, продвижение языка техногенного оползня продолжалось после обрушения ещё несколько дней с постепенным уменьшением скорости смещения от 1,1 м/ч (01.12.2019) до 0,07 м/ч (04.12.2019). Общая длина оползня от стенки отрыва в головной части до языка составила 3000 м, средняя ширина - 585 м, средняя мощность оползня – 35-40 м, а общий объём обрушившихся и оползших отвалов превысил 30 млн. м³.

Судя по данным геодезического мониторинга и космоснимкам, первые признаки приближающегося обрушения отвалов появились за несколько дней до обрушения. В частности, за двое суток до обрушения, а именно 29.11.2019 г. произошло небольшое оползание на самой верхней полке верхнего отвала. Это обрушение с формированием уступа будущего оползня также, как и нарастание скорости смещения стало предвестником того, что отвал переходит из стадии установившейся вторичной ползучести в опасную стадию третичной прогрессирующей ползучести, то есть приближается момент обрушения отвала. Для специалистов инженерно-геологического отдела КГК, работавших в это время на руднике, эти предвестники должны были бы стать сигналом раннего предупреждения о надвигающейся угрозе опасного обрушения.

Таким образом, основной причиной обрушения отвалов и подвижки ТКГ в долине ледника Лысый 1 декабря 2019 г. стала чрезмерная перегрузка отвалов в верхней части склона, характеризующегося крутизной до 20° и сложенного с поверхности льдонасыщенными многолетнемёрзлыми породами, уязвимыми по отношению к нагружению мощными отвалами и потеплению климата.

Из анализа разновременных спутниковых наблюдений и измерений смещения отвалов СВО-3 следует, что наблюдаемое смещение было результатом как движения по поверхности склона (скольжение на границе отвалов и фундамента пустой породы), так и движения по поверхности локализации деформации сдвига внутри фундамента (т. е. ползучесть).

Литература

1. *Торгоев И. А. Ледники, золото и геоэкология Кумтора. – Бишкек, 2016. – 197 с.*
2. *Torgoev I., Omorov B. Mass movement in the waste dump of high-altitude Kumtor goldmine (Kyrgyzstan) // K. Sassa et al. (eds), Landslide Science for a safer Geoenvironment, vol.3, Springer Cham: 2014. – pp 517-521.*
3. *Torgoev I., Toguzbaev S. Rock Glaciers and Landslides in the Waste Dump of High-Altitude Kumtor Goldmine (Kyrgyzstan) // V. Vilimek et al. (eds.), Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk. /Vol. 5, Catastrophic Landslides and Frontiers of Landslide Science, Springer, 2021 – pp 389-395*
4. *Kurylo J., Rykaart M. & Lizcano A. Creep displacements induced from waste rock loading // Proceedings Tailings and mine Waste 2018. Keystone, Colorado, USA. –pp 175-186.*

ОПОЛЗНИ СЕЙСМОГЕННОГО РАЗЖИЖЕНИЯ В ЛЁССОВИДНЫХ СУГЛИНКАХ

И.А. Торгоев, Ю.Г. Алёшин

Институт геомеханики и освоения недр НАН Кыргызской Республики
720053, г. Бишкек, ул. Медерова 98. E-mail: isakbektor@mail.ru

Территория Кыргызской Республики (КР), охватывающая центральную и западную часть горной системы Тянь-Шаня, характеризуется повышенным оползневым риском. Общая площадь территории, подверженной оползневому процессам, составляет 15 тыс. км², что составляет почти 8% от всей площади страны или почти 50% от комфортных для жизнедеятельности территорий Кыргызстана.

Оползни и обвалы происходят по всей территории Кыргызской Республики, но с большей угрозой и частотой они возникают на юге страны (Рис. 1), особенно в Ошской и Жалал-Абадской областях (оползневой пояс Ферганы), в которых квазициклически наблюдаются периоды массовой активизации оползней, когда количество оползневых ЧС превышает несколько десятков событий в год. Оползни в южных областях происходят в основном весной, а массовая активизация оползней отмечается при сочетании интенсивного таяния мощного снежного покрова с пиком весенних дождей.

Развитие и периодическая массовая активизация оползневых процессов в оползневом поясе Ферганы (Рис. 1) связаны с особенностями и неблагоприятным сочетанием геологических и климатических факторов: наличием слабоустойчивых горных склонов, имеющих рыхлый поверхностный чехол (лёсс, лёссовидные суглинки) мощностью в десятки метров; повышенной сейсмической и тектонической активностью региона; переувлажнением грунтов, слагающих склоны за счет интенсивных и обильных атмосферных осадков, снеготаяния и периодического повышения уровней грунтовых и подземных вод.

По данным МЧС КР в стране насчитывается около 5000 активных оползней и более 600 населенных пунктов (10 тыс. жилых домов), подверженных разным степеням оползневого риска (что составляет 33% от общего числа населенных пунктов). За период с 1990 по 2021 гг. в стране произошло 630 крупных оползней ($V > 100$ тыс. м³), в результате которых погибло 279 человек. В дополнение к человеческим жертвам экономический ущерб от оползней оценивается значением примерно в 1,0–1,5% от валового внутреннего продукта.

Из 600 населённых пунктов Кыргызстана в зоне оползневого риска расположено 254, в числе которых в зоне очень высокой опасности находятся 214 населённых пунктов, в зоне высокой опасности – 28 и в зоне средней опасности - 12 населённых пунктов. Ранее подверглось воздействию оползневых процессов 160 населённых пунктов страны.

Наибольшую опасность среди гравитационных смещений масс на горных склонах представляют собой сейсмогенные оползни, которые возникают при сильных местных (Тянь-Шаньских) и региональных (Памиро-Гиндукушских) землетрясениях [1]. Уникальная зона глубокофокусной сейсмичности в районе Гиндукуша является одним из самых сейсмически активных районов Центральной Азии. Сильнейшие землетрясения Гиндукуша ощущаются на большой по площади территории региона, в том числе на территории Кыргызстана. Сопоставление времени проявления ощутимых ($M > 4,5$) землетрясений Памиро-Гиндукушской зоны со временем возникновения крупных оползней, зафиксированных в период 1969-2021 гг. на Кыргызской части территории Тянь-Шаня показало, что подавляющую часть из восьмидесяти сеймосинхронных оползней составляют оползни разжижения и оползни-потоки, затем по повторяемости следует реактивизация древних оползней и наконец, выявлены сейсмогенные блоковые оползни, приуроченные к зонам активных тектонических разломов [2].

Сейсмические колебания от Гиндукушских землетрясений больших магнитуд, произошедших на больших расстояниях (300-400 км) от Кыргызстана, имеют ряд следующих особенностей, в силу которых именно такие сейсмические события могут представлять опасность для оползнеопасных склонов;

- повышенные периоды или низкие частоты сейсмических колебаний на большом удалении из-за частотно-зависимого поглощения, особенно интенсивного в области высоких частот;

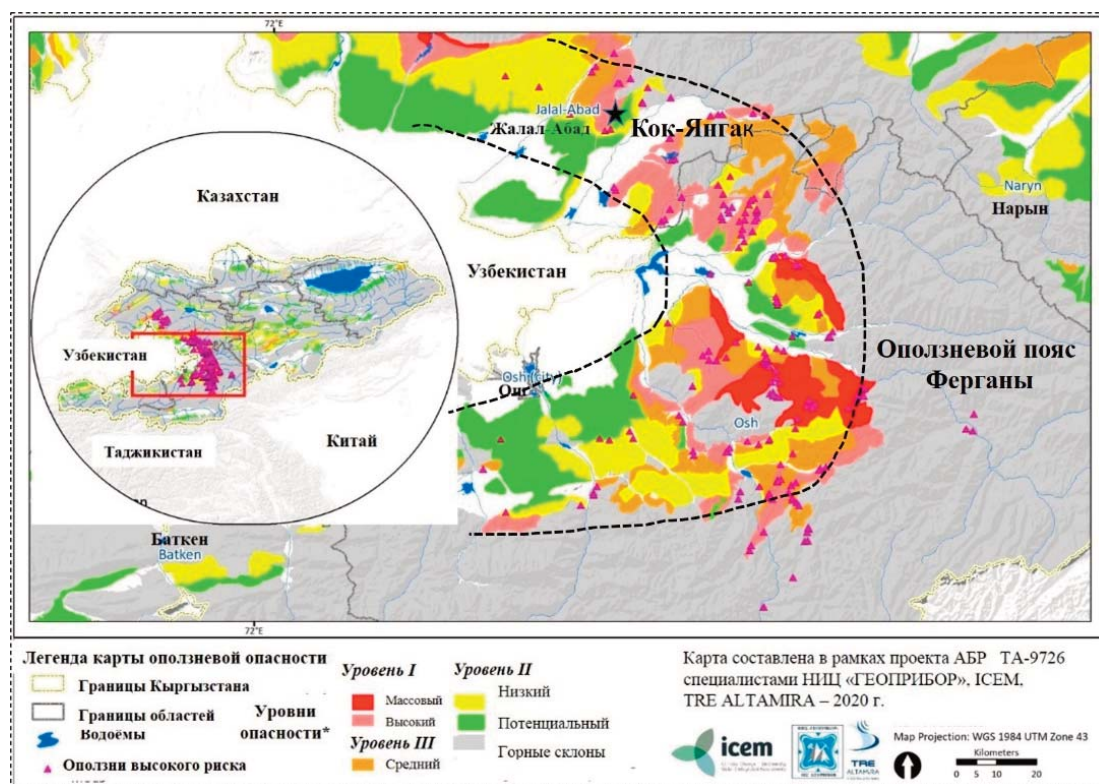


Рис. 1. Карта уровней оползневой опасности в южных областях Кыргызстана: пунктирными линиями выделен оползневой пояс Ферганы.

- исключительно большая продолжительность или ширина импульса на большом удалении от очага, например, на севере Тянь-Шаня (Бишкек, Ташкент, Алматы) она достигает 120 секунд и более;
- повышенные значения пиковых скоростей или ускорений сейсмических колебаний, которые обуславливают высокую степень повреждаемости (обрушения) неустойчивых склонов и зданий;
- большая глубина очагов (до 300 км) обуславливает малую интенсивность поверхностных волн.

В силу отмеченных особенностей глубокофокусные Гиндукушские землетрясения в горах Тянь-Шаня могут вызывать разжижение суглинисто-песчаных грунтов, сейсмопросадку лёссов и возникновение оползней-потоков с большой дальностью распространения. Опасность оползней-потоков, вызываемых землетрясениями, заключается во внезапности их возникновения. Подобные «внезапные» оползни являются причиной катастроф с большим числом человеческих жертв и значительным экономическим ущербом из-за их значительной разрушительной силы и обвалоподобного движения с большой скоростью.

Оползни–потоки составляют две трети от общего числа всех обследованных оползней на территории Кыргызстана. К числу наиболее катастрофичных оползней этого типа, вызвавших гибель 182 человек, относятся следующие: Калдарбай (1973), Сары-Булак (Кок-Жангак, 1976), Кайнар-Булак (1988), Алтынкурёк (1988), Кум-Шоро (1988), Жалгыз-Алча (1991), Кара-Таш (1993, Тосой (1994), Комсомол (1994), Кара-Сөгёт (2003), Кайнама (2004), Кёлмё-Сай (2006), Райкомол (1994, 2009).

Под разжижением понимается явление полной или частичной потери грунтом несущей способности под влиянием динамической (например, сейсмической) нагрузки и переход его в текучее состояние, возникающее в результате разрушения структуры грунта. Основным механизмом разжижения, рассматриваемый в механике грунтов как фильтрационное деформирование грунта, это увеличение порового давления и, как следствие, уменьшение эффективных напряжений. В водонасыщенном массиве грунтов поровая вода (флюиды) в той или иной мере может оказывать на минеральный скелет взвешивающее действие и фильтрационное давление разной направленности, вызываемое фильтрационными объёмными силами. Разжижение грунта может произойти во время землетрясения, потому что при прохождении сейсмической волны частицы грунта начинают колебаться с разными скоростями и часть контактов между ними разрывается, в результате грунт может стать на время водой с взвешенными в ней песчинками. Вода стремится отжаться, но прежде, чем грунт вернётся к первоначальному состоянию, сильно обводнённые склоны, могут обрушиться.

К числу сейсмогенных оползней разжижения, спровоцированных Гиндукушскими землетрясениями, и отличающихся сверхдальним распространением, относится оползень Сары-Булак, сформировавшийся северо-западнее г. Кок-Янбак (Рис. 2). Первые оползневые трещины протяжённостью по 100-120 м и глубиной до 3 м возникли в головной части оползня в конце февраля 1974 г. Есть основания предположить, что эти сейсмопросадочные трещины образовались после землетрясения с магнитудой $M=5,4$, произошедшего 22 февраля в зоне Памиро-Гиндукуша, на глубине 116 км. Ниже трещин лёссовидные грунты просели на 0,5-1,0 м.

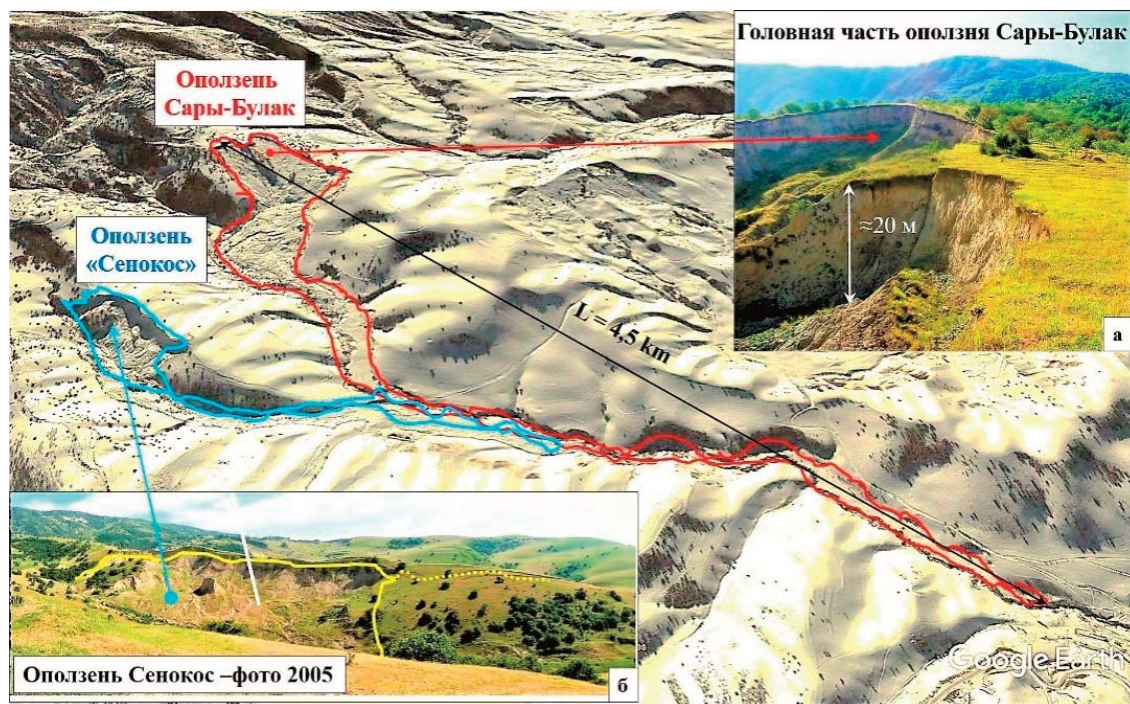


Рис. 2. Оползни Сары-Булак и Сенокос в районе города Кок-Янбак: а) головная часть оползня Сары-Булак с мощностью лёсса более 20 м; б) панорама оползня Сенокос.

В геологическом строении рассматриваемого участка принимают участие отложения юрского и четвертичного возрастов. Юрские отложения, представленные Тюлекской свитой (J_{2-3tl}), состоят из песчаников, глин, конгломератов и имеют мощность до 500 м. Общее их падение на запад, а углы падения, обусловленные разломами, варьируют в интервале $20 - 40^\circ$. Четвертичные отложения на рассматриваемом участке характеризуются повсеместным распространением и представлены, в основном лёссовидными суглинками делювиального и пролювиального генезиса. Они отличаются макропористостью и значительной мощностью, достигающей 40 м. На подстилающих юрских отложениях лёссовидные суглинки залегают с угловым несогласием и их контакт, обнаженный в стенках срыва, имеет падение на север под углом $10-12^\circ$. Наличие этого углового несогласия явилось одной из предпосылок возникновения данного оползня.

Оползень Сары-Булак возник в лёссовидных суглинках со средней мощностью 20 м (Рис. 2а). В геоморфологическом отношении оползневой участок характеризуется сильной расчлененностью рельефа, где уклоны поверхности варьируют в интервале от $12-14^\circ$ до 30° . К числу особенностей геолого-тектонического строения района оползня относится наличие здесь тектонических нарушений, отдельные из которых оконтуривают участок с востока, а другие имеют место непосредственно в пределах оползневой участка.

Гидрогеологические особенности оползневой участка во многом предопределяются характером водоносных горизонтов и комплексов, сформировавшихся в юрских отложениях. Подземные воды, приуроченные к ним, имеют напорный характер и трещинно-пластовый тип циркуляции.

Разгрузка их во многом обусловлена наличием разломов, непосредственно на участке оползня прикрытых четвертичными отложениями. Дебиты родников, приуроченных к этим водоносным горизонтам, составляли 0,3-2,0 л/сек. Важную роль при разгрузке напорных вод юрских водоносных горизонтов сыграло наличие углового несогласия между отложениями юры и четвертичного воз-

раста. Разгрузка подземных вод по этому контакту, обеспечив значительное увлажнение, привела к снижению прочностных параметров пород приконтактной части как подстилающих юрских образований, так и покрывающих их суглинков, до предельных их значений и способствовала формированию своеобразной сильно увлажнённой зоны скольжения, которая в сочетании с отмеченными уклонами контакта и рельефа, привела к возникновению оползня Сары-Булак. Таким образом, основной причиной снижения устойчивости склона явились подземные воды, уровень которых по данным мониторинга постоянно поднимался, начиная с 1969 г.

Мониторинг оползневых смещений на реперах, установленных на первоначальных трещинах, показал, что в 1974-1975 гг. расстояния между этими реперами практически не изменялись, за исключением небольших (4-6 см) подвижек в весенние периоды. Весной 1976 г., начиная с апреля были зафиксированы подвижки, которые вплоть до основного смещения носили нерегулярный характер, когда медленные (1,7-2,0 мм/сутки) или быстрые (8-10 мм/сутки) смещения сменялись перерывами в движении продолжительностью от 10 до 30 дней, а общая величина подвижек с апреля до катастрофической разгрузки оползня 27 ноября 1976 г. составила 0,5 м.

Разгрузка оползня Сары-Булак была спровоцирована землетрясением с магнитудой $M=6,1$, произошедшим 27 ноября 1976 г. в Гиндукуше, на глубине 190 км. Следует отметить, что подавляющее число оползней и оползневых смещений в рассматриваемом районе происходит в весенние месяцы. Сход оползневых масс произошел следующим образом: сначала с шумом и с большой скоростью сползла левая часть склона, которая прошла по днищу ручья Сары-Булак на расстояние более 1 км (Рис. 2). О высокой скорости оползневого потока свидетельствует тот факт, что женщина и ребёнок, находившиеся в момент обрушения на расстоянии 700 м от стенки отрыва, не успели отбежать на безопасный участок склона и оказались погребёнными под оползнем. Объем первоначально сошедшей оползневой массы составил 2,5 млн m^3 . Второе смещение, уже центральной части склона ниже первичных трещин, произошло спустя 3 часа после первого. Оползневые массы мгновенно распространились по дну сая, заполняя на склон в местах его изгиба, разрушая на пути своего движения все постройки. Общий объем сползшей массы достиг 4,5 млн m^3 , а сами оползшие грунты сразу после схода представляли собой кашеобразную, увлажнённую массу повышенной текучести. Общая протяженность оползневого потока на 9 декабря 1976 г. составила 4,5 км (Рис. 2), при этом за первый день он продвинулся на 2 км, а в последующие 2 дня (28-29 ноября) еще 2 км; с 30 ноября по 9 декабря еще 0,5 км. К августу 1977 г. общий объем смещённой массы достиг 8 млн m^3 .

Чрезвычайно большая дальность распространения оползневых масс, превышающая 4,5 км, объясняется не только крутым уклоном тальвега ручья Сары-Булак, но и разжижением лёссовидных суглинков в зоне скольжения, вызванным сейсмическими колебаниями значительной продолжительности от Гиндукушского землетрясения 27 ноября 1976г. О том, что произошло разжижение суглинков именно в зоне скольжения свидетельствуют следующие факты: во время основного смещения наблюдался столб пыли, а сразу после смещения по свидетельству очевидцев появились фонтаны воды, которые через некоторое время исчезли. Отмечается также, что поверхностная толща оползневых масс находилась в слабо влажном, даже сухом состоянии. После смещения оползня у подножья стенки отрыва обнажились выходы подземных вод, а на поверхности оползневого потока, в понижениях появились небольшие водоёмы, которые постепенно увеличивались в размерах.

В результате геотехнических исследований и испытаний лёссовидных суглинков, отобранных из трёх скважин глубиной до 25 м, были получены следующие результаты. По гранулометрическому составу грунты оползневого склона относятся к пылеватым суглинкам: установлено, что содержание пылеватых фракций с размером частиц 0,005-0,05 мм составляет 71,9-85,7%, песчаной фракции – от 3 до 10 % (при этом преобладают частицы размером 0,5-0,05 мм), содержание глинистых частиц размером меньше 0,005 мм варьирует от 11,3 до 18,1 %. Удельный вес составляет 2,67-2,71 $г/см^3$. Естественная влажность суглинков изменяется по глубине сверху вниз от 7,7 до 30,2 % (Рис. 3а). Предел пластичности изменяется в диапазоне от 27,6 до 35,4 %, предел текучести – от 18,8 до 23,9%, индекс пластичности – от 8,8 до 16%. Пористость в среднем составляет 52%, что предопределяет их значительную просадочность, которая проявилась на склоне весной 1974 г. Содержание карбонатов находится в пределах 20-25%. Прочностные параметры грунтов определялись при естественной влажности и в замоченном состоянии. Установлено, что эффективный угол внутреннего трения (φ) в насыщенном состоянии изменялся от 23,3° до 26,1°, а эффективное сцепление (C') –

от 5 до 10 кПа. По классификации грунтов Казагранде лёссовидные суглинки представляют собой глинистый ил (CL) неорганического происхождения (Рис. 3б).

Результаты геотехнических испытаний свидетельствуют о том, что описываемый грунт имеет типичные характеристики лёссовых пород и может рассматриваться как метастабильный материал, способный к обрушению при определенных условиях на месте. В частности, сильно водонасыщенный лёссовидный суглинок может оказаться разжиженным в результате колебаний в ходе землетрясения по причине циклической нагрузки, вызванной восходящим распространением сдвиговых сейсмических волн. Для оценки потенциала разжижаемости лёссовидных суглинков, слагающих тело оползня Сары-Булак, на основе полученных результатов геотехнических испытаний была построена диаграмма пластичности для оценки разных типов грунтов, отобранных в оползнеопасных районах Кок-Янгака, Таран-Базара и Майлуу-Суу. Диаграмма представлена на Рис. 3 и дает основания считать грунты в окрестностях Кок-Янгака и Таран-Базара, как попадающие в пределы зоны потенциального разжижения.

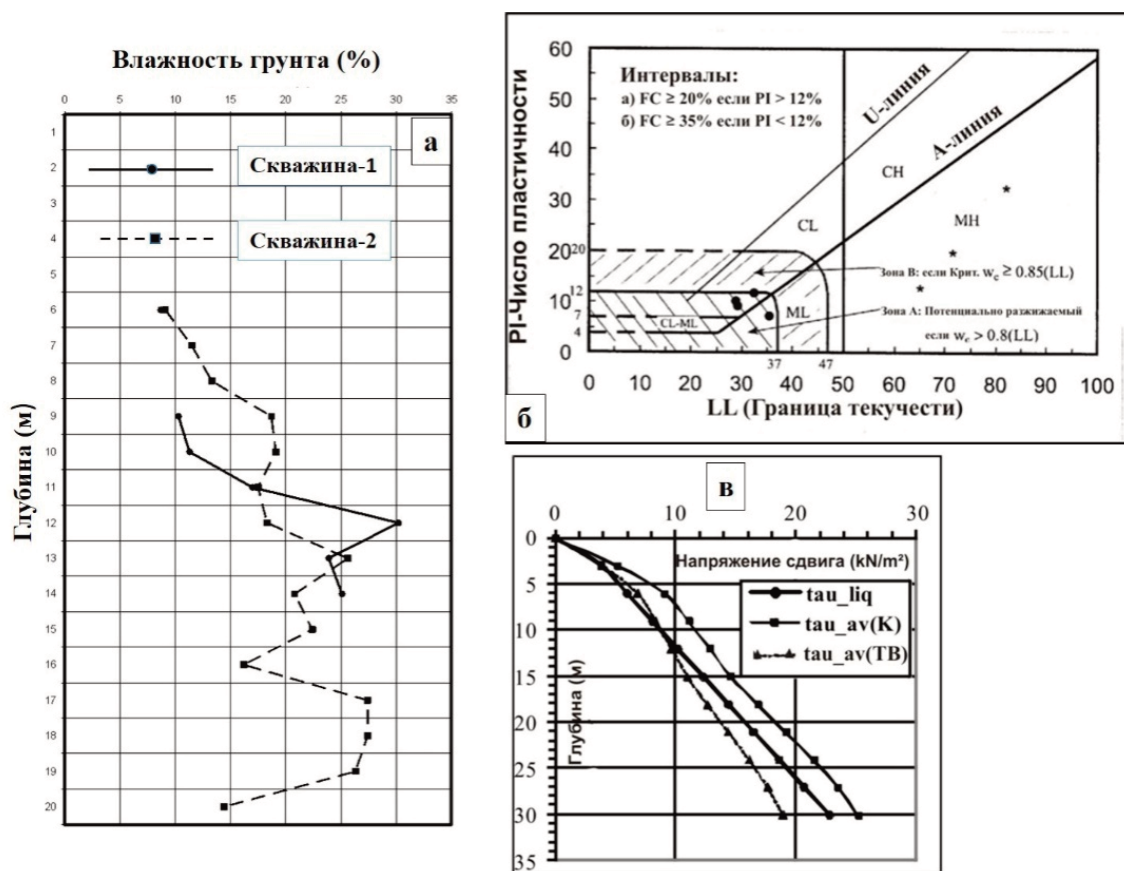


Рис. 3. Геотехнические свойства лёссовидных суглинков, отобранных на оползневом склоне Сары-Булак в Кок-Янгаке: а) естественная влажность суглинков на глубинах от 6 до 20 м; б) диаграмма пластичности; в) потенциал разжижения лёссовидных суглинков, отобранных с различных глубин оползня Сары-Булак (К).

Для оценки фактической разжижаемости грунтов на разных глубинах залегания была использована методика, базирующаяся на сопоставлении средних напряжений сдвига, вызываемых землетрясением, с напряжениями, вызывающими разжижение грунтов на той или иной глубине.

Средние напряжения сдвига, вызванные землетрясением (τ_{av}), были вычислены с использованием следующей формулы:

$$\tau_{av} = \frac{0.65 * \gamma * h * a_{max}}{g * R_d}$$

где: γh - общие нормальные напряжения на рассматриваемой глубине; a_{max} - максимальные ускорения грунта, ожидаемые в районе: $a_{max} = 0.2 g$ для Кок - Янгака, g - ускорение свободного падения R_d - фактор участия нелинейных сдвигов.

Напряжения, вызывающие разжижение, были вычислены с использованием следующей формулы:

$$\tau_1 = \frac{\sigma'_{vo} * \sigma_{dc} * c_r * D_r}{2 * \sigma_a * 50}$$

где: σ'_{vo} - вертикальные эффективные напряжения; $\sigma_{dc}/2 \sigma_a$ – коэффициент напряжений, вызывающий разжижение, и зависящий от магнитуды землетрясений, выраженный в виде выделяющихся циклов напряжений (N_c) и среднего размера зерна (D_{50}) в массиве. Для магнитуды $M=7$, $N_c = 10$ циклам и принимая $D_{50} = 0.03$ мм, коэффициент напряжений равен 0,200; D_r - относительная плотность материала, принятая равной 40%; c_r - поправочный фактор для относительной плотности материала, для $D_r < 50\%$, $c_r = 0.57$

После вычислений и графического оформления результатов (Рис. 2в) стало очевидным, что водонасыщенный материал с приведёнными выше свойствами является потенциально разжижаемым до глубины в 30 м в Кок – Янгаке, в том числе для участка оползня Сары-Булак.

Оценка устойчивости оползнеопасного склона была выполнена с использованием компьютерной программы SLIDE 4.0. Расчёты применительно к различным условиям моделирования (сочетания влажности, уровня подземных вод, сейсмической нагрузки) показали, что для зафиксированного в момент оползания уровня подземных вод запас устойчивости достигает критического значения ($K_{уст} = 1,0$). В этом случае воздействие сейсмических колебаний с длительностью характерной для Гиндукушских землетрясений ($t > 1,5-2$, мин) резко снижает $K_{уст}$, что и вызвало обрушение склона в Сары-Булаке, то есть землетрясение стало спусковым (триггерным) механизмом оползания склона.

Литература

1. Ниязов Р.А. Оползни Узбекистана (тенденции развития на рубеже XXI века). Ташкент: ГИДРОИНГЕО, 2009, 208 с.
2. Torgoev I., Nijazov R., Havenith H.-B. Tien-Shan landslides triggered by earthquakes in Pamir-Hindukush zone // In Margottini C., Canuti P. and K. Sassa (Eds.), *Landslide science and Practice*, vol. 5. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013, pp 191–197.

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И СВОЙСТВ ГРУНТОВ СЕЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ЗОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Н.Н. Ухова¹, Ю.В. Генсировский², Т.Г. Рященко¹

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск.

E-mail: nat_ukhova@crust.irk.ru, ryashenk@crust.irk.ru

²Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Сахалинский филиал,

г. Южно-Сахалинск. E-mail: gensirovskiy@mail.ru

Как показывают результаты работ, проводимых в последнее время рядом исследователей, распространение селевых процессов в зоне многолетнемерзлых пород (ММП) гораздо шире, чем было принято считать ранее [1, 3, 5, 6, 7, 10].

В 2012-2021 гг. специалистами Сахалинского филиала ДВГИ ДВО РАН проводились работы по изучению селевых потоков на территории Восточной Сибири, Северо-Востока и Дальнего Востока России. В настоящей работе приводятся данные по двум горным районам селеобразования, где имеют распространение многолетнемерзлые породы: Кодарский хребет, бассейн р. Апсат (Становое нагорье, Забайкальский край) и Баджальский хребет, бассейн р. Урми (Сихоте-Алинь, Хабаровский край) [2, 8, 13, 14].

Хребет Кодар имеет высокогорный альпийский рельеф. Основной фон рельефа создан нивально-экзарационными процессами, приведшими к образованию скульптурных и аккумулятивных гляциальных форм. Глубина расчленения рельефа достигает 1500–1670 м. Центральная часть хребта подвержена современному оледенению.

Геологическое строение района отличается большой сложностью, что определяется распространением разновозрастных комплексов горных пород с преобладанием докембрийских.

Осадочные и метаморфические образования архея (AR) представлены гнейсами, кристаллическими сланцами, кварцитами, гранитами и гранитогнейсами. Породы протерозоя (PR) представлены метаморфизованными песчаниками, алевролитами, филлитами, известняками. Мезозойские отложения (MZ) представлены юрско-меловыми (J-K) конгломератами, гравелитами, песчаниками, алевролитам и углистыми алевролитами.

Четвертичные отложения (Q) представлены песками, супесями, глинами, суглинками, галечниками, валунниками. На склонах гор и их водоразделах сплошным чехлом залегают элювиальные и делювиальные отложения. В гольцовых зонах развиты осыпи и курумы.

Климат отличается резко выраженной континентальностью, обусловленной внутриматериковым месторасположением района, значительным влиянием азиатского антициклона и сложной орографией местности, кроме того, значительное влияние на термический режим района оказывают многолетнемерзлые породы.

Баджальский хребет имеет среднегорный альпийский рельеф. Как и в случае с хребтом Кодар, основные черты рельефа созданы нивально-экзарационными процессами. Глубина расчленения достигает 800-1200 м.

В геологическом строении территории основные горные породы представлены гранитоидами, порфиroidными гранитами и гранит-порфирами мелового возраста (K).

Так же, как и в Кодарском хребте, четвертичные отложения (Q) представлены песками, супесями, глинами, суглинками, галечниками, валунниками. На склонах гор и их водоразделах сплошным чехлом залегают элювиальные и делювиальные отложения. В гольцовых зонах развиты осыпи и курумы.

В обоих рассматриваемых районах селевые процессы имеют широкое распространение, объемы наиболее крупных селей превышают 1000000 м³. На территории обоих горных районов многолетнемерзлые породы имеют повсеместное распространение.

С целью изучения ряда аналитических параметров селевых отложений и перспективы прогноза развития селевых процессов были отобраны образцы дисперсных грунтов нарушенной структуры (slQ₄) из зон транзита, селевых валов и конусов выноса двух районов: долина реки Быйики (бассейн р. Чара, Кодарский хребет) и бассейн реки Урми (Баджальский хребет) в абсолютных отметках 1000 – 1500 м.

В Центре коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (г. Иркутск, Россия) были выполнены просмотр и описание всех образцов, для определения генезиса учитывалось геоморфологическое положение места отбора и проведен комплекс аналитических исследований – определение гранулометрического состава, микроструктуры и некоторых физических показателей. Образцы, представляющие селевые отложения (slQ₄), относятся к группе крупнообломочных грунтов с песчаным заполнителем, поэтому гранулометрический анализ выполнялся ситовым методом, для некоторых объектов – комбинированным: после отсева для фракции < 0,5 мм применялся метод пипетки с тремя способами подготовки образца к анализу – агрегатным, полудисперсным, дисперсным с полным разрушением агрегатов [4, 9]. В табл. 1 и 2 приведены данные гранулометрического анализа для некоторых исследуемых образцов.

Для песчаного заполнителя, связного песка и песка из селевых образований определялись плотности при рыхлом и плотном сложении (метод цилиндра), углы естественного откоса на воздухе и под водой, коэффициент фильтрации и седиментационный объем (табл. 3) [4].

Таблица 1.								
Результаты гранулометрического анализа грунтов (рассев+пипетка)								
№ образца	Содержание фракций, %							
	>10мм	10-7 мм	7-5 мм	5-3 мм	3-2 мм	2-1 мм	1-0,5мм	<0,5мм
Бассейн р. Урми, Баджальский хребет								
Урми 1 – зона транзита селевого потока, slQ ₄ cr	25,8	10,2	8,7	14,6	12,5	15,3	5,9	7,0
Урми 2 – конус выноса селевого потока, slQ ₄ cr	29,3	8,7	7,9	10,0	9,9	18,3	8,7	7,2
Урми 3 – образец русловых отложений, aQ ₄ ps	0,1	0,8	0,6	0,7	1,3	13,3	24,5	58,7
Бассейн р. Чара, Кодарский хребет								
Левый берег р. Быйики по борту долины в уступ высокой поймы 1б- slQ ₄ cr	37,3	6,0	4,0	5,8	4,4	10,7	8,2	23,6
Правый приток р. Быйики по селевой вал вдоль русла и конус выноса селя 3- slQ ₄ cr	22,1	8,3	8,6	11,9	8,9	15,0	5,3	19,9
Примечание. aQ ₄ ps – русловые отложения, cr – крупнообломочный грунт («крупнообломочная фация» селевого потока slQ ₄).								

Таблица 2.							
Результаты гранулометрического анализа грунтов							
№ образца	Содержание фракций, %						Название грунта
	M _{пс} ¹	M _{пс} ²	M _п ¹	M _п ²	M _с ¹	M _с ²	
Бассейн р. Урми, Баджальский хребет							
Урми 1 – зона транзита селевого потока, slQ ₄ ps	58,0	39,4	1,6	0,8	0,1	0,1	песок
	55,4	35,0	6,3	2,3	0,5	0,5	песок
	51,0	26,1	1,3	2,3	1,8	17,5	суглинок
Бассейн р. Чара, Кодарский хребет							
2а – левый берег р. Быйики, песок со следами связности (aQ ₄ –ps**).	38,3	59,1	2,6	0,0	0,0	0,0	песок
	35,3	61,6	1,2	0,5	1,4	0,0	песок
	32,2	48,1	3,8	0,4	0,4	15,1	суглинок
Примечание. Ps – песок, ps** – связный песок); содержание фракций: M _{пс} ¹ – крупно-среднепесчаная (0,50–0,25 мм), M _{пс} ² – мелко-тонкопесчаная (0,25–0,05), M _п ¹ – крупнопылеватая (0,05–0,01), M _п ² – мелкопылеватая (0,010–0,002), M _с ¹ – грубоглинистая (0,002–0,001), M _с ² – тонкоглинистая (< 0,001); верхняя строка – результаты гранулометрического анализа с агрегатной подготовкой образца, средняя – то же с полудисперсной (стандартной), нижняя – то же с дисперсной; название грунта – по содержанию фракции < 0,002 мм (M _с ¹ + M _с ²).							

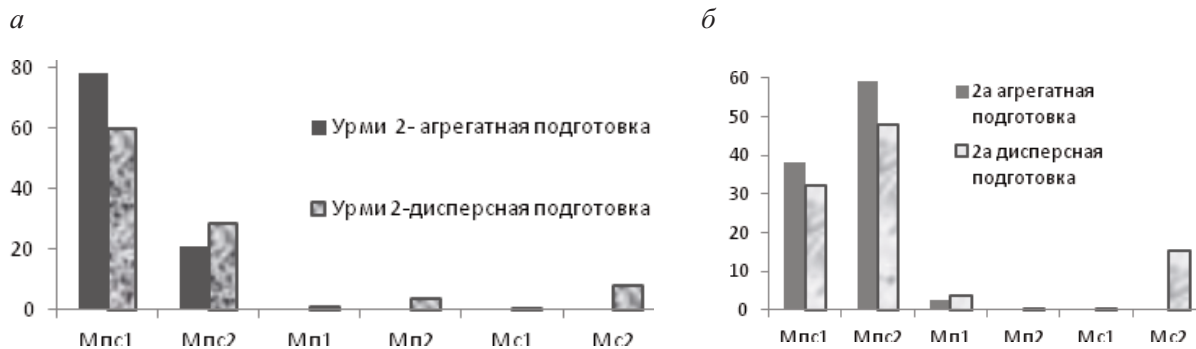


Рис. 1. Сравнение результатов гранулометрического анализ агрегатной и дисперсной (полное разрушение агрегатов) подготовке образцов: а) Урми 2–конус выноса селевого потока, sIQ₄ ps; б) 2а – левый берег р. Быйики, песок со следами связности (aQ₄–ps**).

По данным стандартной гранулометрии (средняя строка в табл. 2) образцы представлены песком, в котором преобладают крупно-среднепесчаная (0,50–0,25мм) и мелко-тонкопесчаная (0,25–0,05 мм) фракции, а пылеватые и глинистые частицы присутствуют в небольшом количестве. При дисперсной подготовке образцов к анализу с полным разрушением агрегатов (нижняя строка в табл. 1) песок «превратился» в суглинок, так как реальное содержание глинистых частиц составило 15,1–17,5%. На рисунке показано увеличение доли глинистых частиц и для грунта из конуса выноса селя – Урми-2.

Аналогичная ситуация отмечается для всех исследуемых образцов бассейна рек Урми и Чара. Появление агрегатов в заполнителе селевых отложений является результатом постдиагенетических преобразований под воздействием криогенных процессов (процессы сезонного промерзания-оттаивания), с участием тонкоглинистой составляющей селевого материала, которая вместе с песчаными и пылеватыми частицами являлась продуктом транзита и аккумуляции селевого потока.

Так называемые связные (облессованные) пески достаточно давно выделены Т.Г. Рященко на юге Восточной Сибири, они имеют агрегированно-скелетную микроструктуру, иногда слабо пластичны и просадочны, резко снижают угол естественного откоса под водой, имеют заниженный коэффициент фильтрации; рассматриваются они как результат лессового литогенеза отложений, где ведущим фактором являются криогенные воздействия [11,12,15].

Для образцов селевых отложений был определен ряд физических параметров (табл. 3). В таблице представлены данные для некоторых образцов, характерные для всей выборки.

Таблица 3.								
Плотность, углы естественного откоса, коэффициент фильтрации и седиментационный объем песков и песчаного заполнителя крупнообломочных грунтов селевых отложений								
№ образца	ρ_{\min}	ρ_{\max}	$\Delta \rho$	$\phi 1$	$\phi 2$	$\Delta \phi$	K_{ϕ}	V
Бассейн р. Урми, Баджальский хребет								
Урми 1 – зона транзита селевого потока, sIQ ₄ cr	1,37	1,45	0,08	34о	27о	7о	36,9	3,2
Урми 2 – конус выноса селевого потока, sIQ ₄ cr	1,40	1,46	0,06	31о	25о	6о	24,6	2,8
Бассейн р. Чара, Кодарский хребет								
1б - селевые отложения ниже уступа поймы р. Быйики sIQ ₄ ps	1,43	1,53	0,10	34о	21о	13о	12,7	1,9
1в – селевые отложения на высоте 1,4 м от уреза воды, р.Быйикис IQ ₄ cr	1,44	1,55	0,11	35о	24о	11о	-	2,4
Примечание. ρ_{\min} , ρ_{\max} – плотность песка рыхлого и плотного сложения, г/см ³ , $\Delta \rho$ – степень увеличение плотности при уплотнении; $\phi 1$, $\phi 2$ – углы естественного откоса на воздухе и под водой, $\Delta \phi$ – степень уменьшения угла под водой; K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, м/сут; V – седиментационный объем, см ³ .								

При сравнительном анализе физических свойств отложений селевых потоков двух горных регионов выявлено достаточно много сходств (табл. 3).

«Крупнообломочная фация» селевых отложений содержит песчаный наполнитель. По данным гранулометрического анализа он составляет 25,6–42,5 %, преобладают частицы 2,0–0,5 мм, практически отсутствует фракция 0,25–0,10 мм (табл. 1). Этот наполнитель также обладает признаками плавунности – угол естественного откоса под водой снижается на 11° для бассейна Чары и 6–9° – для бассейна Урми, структурная связность отсутствует (седиментационный объем < 3,3 см³).

Определялась плотность минеральной части песчаного наполнителя, «песчаной фации» селя, супеси и связного песка аллювиального комплекса. Практически значения плотности исследованных образцов оказались почти одинаковыми – 2,65–2,69 г/см³ (видимо, тяжелых минералов здесь мало). «Песчаная фация» селя (обр. 1б) – это крупно-среднезернистый песок (преобладает фракция 0,50–0,25 мм – 47,4%), в котором заметно содержание частиц < 0,1 мм (28,8%), но практически отсутствуют дресва и щебень (частицы > 2 мм). Песок имеет относительно высокий коэффициент фильтрации (12,7 м/сут), что подтверждает отсутствие связности (агрегатов), однако угол его откоса под водой резко снижается (на 13°), что способствует плавунности при водонасыщении (это также «хороший» материал для твердой составляющей селевого потока).

Можно предположить, что в бассейнах рек Урми и Чара с суровыми климатическими условиями процессы облессования песчано-глинистых отложений различного генезиса имеют широкое распространение. Эти отложения участвуют в формировании твердой составляющей селевых потоков, при этом присутствие глинистых фракций в агрегатах способствуют проявлению плавунности водонасыщенных масс, а снижение угла естественного откоса при водонасыщении и отсутствие структурной связности в этих плавунках (седиментационный объем исследованной агрегированной супеси и связного песка < 3,3 см³ – табл. 3) усиливают подвижность селевых потоков.

В заключение можно сделать следующие выводы.

Для изученных районов – бассейнов рек Урми и Чара с суровым резко континентальным климатом свойственно развитие процессов лессового литогенеза, при котором песчано-глинистые отложения различного генезиса (аллювий, делювий, пролювий и др.) под воздействием криогенных процессов (сезонное промерзание-оттаивание или многолетнее промерзание толщи) приобретают агрегированную микроструктуру, агрегаты при этом становятся хранилищем тонкоглинистой (< 0,001 мм), мелко-тонкопесчаной (0,25-0,05 мм) и мелкопылевой (0,010-0,002) фракций, присутствие которых способствует проявлению плавунности водонасыщенных масс.

Селевые отложения исследованных районов характеризуются присутствием в качестве наполнителя (или «песчаной» фации) песков, которые являются потенциальными плавунками бесструктурного типа, что подтверждается двумя признаками: существенное снижение угла естественного откоса под водой (для бассейна р.Чары - $\Delta\phi = 11\text{--}13^\circ$; для бассейна р. Урми - $\Delta\phi = 6\text{--}9,5^\circ$) и небольшая величина седиментационного объема ($V < 3,3 \text{ см}^3$). Значения коэффициента фильтрации (2,4–44,3 м/сут) показывают высокую, но разнородную водопроницаемость «грубых» грунтов, которые образуют твердую составляющую селевых потоков.

Литература

1. Акулов Н.И., Акулова В.В., Штельмах С.И., Рубцова М.Н., Шолохов П.А. Строение и состав селевых потоков Восточного Саяна // *Литоология и полезные ископаемые*. 2018. № 1, с. 41–57.
2. Генсировский Ю.В., Лобкина В.А., Музыченко Л.Е., Музыченко А.А., Михалев М.В., Степнова Ю.А. Условия формирования селей на Северо-Востоке России. *Геориск Том XIV*, № 3/2020, с. 68–76.
3. Катастрофические селевые потоки, произошедшие в поселке Аршан Тункинского района Республики Бурятия 28 июня 2014 г. / С.А. Макаров, А.А. Черкашина, Ж.В. Атутова и др. Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. 2014, 111с.
4. Ломтадзе В.Д. *Инженерная геология. Инженерная петрология*. Л.: Недра. 1984, 527 с.
5. Лапердин В.К., Леви К.Г., Имаев В.С, Молочый В.Г. *Опасные геологические процессы в Юго-Западном Прибайкалье*. Иркутск: ИЗК СО РАН. 2016, 206 с.
6. Лапердин В.К., Тржицинский Ю.Б. *Экзогенные геологические процессы и сели Восточного Саяна*. Новосибирск: Наука, 1977, 103 с.

7. Макаров С.А. Сели Прибайкалья. Иркутск: Из-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. 2014, 111 с.
8. Музыченко А.А., Генсиоровский Ю.В., Музыченко Л.Е. Распространение селевых процессов на территории Хабаровского края / Труды 6-й Международной конференции, Таджикистан). Том 1. Душанбе: ООО «Промоушн». 2020, с. 491-497.
9. Ряценко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2010, 287 с.
10. Ряценко Т.Г. Состав и свойства селевых отложений на железнодорожном участке Кодар-Леприндо (БАМ)// Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. Вып. 18. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (24-25 марта 2016 г.). Москва: РУДН, 2016, с.95-100.
11. Ряценко Т.Г., Акулова В.В., Ербаева М.А., Гринь Н.Н. Процессы лессообразования в Приангарье, Забайкалье, Западной Монголии и Северо-Западном Китае (сравнительный анализ) // География и природные ресурсы. 2007. № 2, с.105-113.
12. Ряценко Т.Г., Ухова Н.Н. Химический состав дисперсных грунтов: возможности и прогнозы (юг Восточной Сибири). Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2008, 131 с.
13. Ухова Н.Н., Генсиоровский Ю.В., Казаков Н. А., Ряценко Т.Г. Физико-химические свойства селевых отложений в различных горных районах России //Труды Третьей международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». Южно-Сахалинск. 22-26 сентября 2014, с. 123-127.
14. Ухова Н.Н., Казаков Н. А., Генсиоровский Ю.В., Ряценко Т.Г. Состав пород потенциальных селевых массивов как фактор, определяющий структурно-реологический тип селевого потока //Селевые потоки: Катастрофы, Риск, Прогноз, Защита. Труды Второй конф. Москва. 2012, с. 45-47.
15. Ryashchenko T.G., Akulova V.V., Ukhova N.N. Processes loessal lithogenesis during the leistocene – holocene (south of the Eastern Siberia) // Quaternary International. 2011. № 240 (2011), pp. 150–155.

ПОДТОПЛЕНИЕ И СТАТИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ КАК ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ИЗМЕНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ

Б. Хамраев, А.А. Лаврусевич

Московский государственный строительный университет, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.
E-mail: lavrusevich@yandex.ru

При строительстве зданий и сооружений на лессовых массивах зачастую не учитывается такой важнейший фактор как подтопление. Причинами подтопления нередко являются барражный эффект и, как правило, утечки из водонесущих коммуникаций и др. Подтопление застроенных территорий приводит к существенному ухудшению инженерно-геологических условий, к повышению приращения сейсмичности, ухудшению прочностных и деформационных свойств грунтов. Эти процессы изучены недостаточно. Поэтому для обоснования реконструкции и строительства новых зданий и сооружений на подтапливаемых территориях и обеспечения их нормальной эксплуатации, а также для расширения существующих границ городов необходимо проведение специальных исследований, результаты которых должны учитываться, в том числе, при проведении сейсмического микрорайонирования.

Проблема усугубляется тем, что в южных районах России и в ряде стран СНГ, характеризующихся значительной сейсмичностью, строительство ведется в основном на территории развития лессовых грунтов, свойства которых при замачивании изменяются наиболее сильно.

Под сейсмическими свойствами лессовых грунтов нами понимается скорость распространения в них продольных и поперечных сейсмических волн, их амплитуды и частоты, параметры поглощения сейсмической энергии.

В конце XIX в. И.В. Мушкетов (1899) полагал, что скорость упругих волн повышается с усилением импульса [1]. Н.Н. Горяинов, Ф.М. Ляховицкий (1979) получили данные о сейсмических свойствах лессовых грунтов в естественном залегании и на образцах, и установили зависимость между влажностью и скоростью распространения продольных волн в лессовых грунтах с нарушенной структурой. Было показано, что с увеличением влажности скорость изменяется мало и лишь при полном водонасыщении скорость волн резко возрастает до значений порядка 1400-1500 м/сек [3].

И.Г. Миндель (1970) впервые определил коэффициенты и декременты поглощения продольных волн на акустических частотах для лессовых грунтов юга Украины и Яванской долины Таджикистана. Им установлены корреляционные зависимости между влажностью лессовых грунтов, показателями динамического зондирования, модулем деформации грунтов при испытании штампами, с одной стороны, и скоростью продольных акустических волн с другой [3].

Н.И. Кригер и А.Д. Кожевников (1975, 1976, 1977, 1983, 1990), Н.И. Кригер, А.С. Алешин, А.Д. Кожевников, И.Г. Миндель (1980), Н.И. Кригер (1974, 1984, 1985, 1988), Н.И. Кригер, А.С. Алешин, А.Д. Кожевников (1982), Г.Л. Владова (1986) [4, 5, 6 и др.] рассмотрели влияние процессов влагопереноса в дисперсных породах и явления расклинивания дисперсных пород тонкими водными пленками на сейсмические свойства лессовых пород и глин, установили «парадоксальный интервал» влажности дисперсных пород, в котором скорости упругих волн уменьшаются.

Таким образом, к концу XX в. были установлены зависимости скорости сейсмических волн в лессовых грунтах от их влажности в полевых и лабораторных условиях *без воздействия внешней статической нагрузки*. Осталось неизученным и изменение скорости распространения сейсмических волн в лессовых грунтах, *при различном сочетании статических нагрузок и влажностей*.

Авторами в лабораторных условиях на образцах лёссовых грунтов были изучены изменения скорости продольных сейсмических волн (V_p) при различном уровне статической нагрузки и влажности.

Исследования проводились на специально сконструированном авторами лабораторном стенде. Для выявления анизотропных свойств лессовых грунтов параметр V_p определялся в двух направлениях: горизонтальном и вертикальном.

Для проведения лабораторных экспериментальных исследований были использованы монолиты лёссовых грунтов Узбекистана, отобранные на подтопленных территориях г.Карши и на двух участках не подтопленной территории г.Ташкента в районе Чиланзар.

Первый участок на территории г.Карши был еще не застроенным, на нем развиты лессовые грунты II типа грунтовых условий по просадочности, в основном, представленные суглинками и супесями желтовато-коричневого цвета с прослоем погребенной почвы, пылеватой, светло-коричневой, комковатой с включением мелких, до 1,5 мм кристаллов солей, при глубине залегания 12-14 м. Грунтовые воды залегали на глубине от 0 до 3м.

Второй участок находился в Чиланзарском районе г.Ташкента в пределах застроенной и не подтопленной территории. Грунты представлены в основном, суглинками комковатыми, плотными, сильно-загипсованными, с прослойками супеси красноватого цвета. Глубина уровня грунтовых вод в пределах 20-25 м.

На каждом участке проходились шурфы с отбором через каждый метр по глубине монолитов грунта ненарушенной структуры, размером 20х20х20 см, для лабораторных исследований. Из каждого монолита вырезалось два одинаковых образца (по вертикали и горизонтали для обеспечения возможности изучения анизотропных свойств грунтов по параметру V_p).

Для получения репрезентативных данных было выполнено более 2500 экспериментальных исследований образцов лёссовых грунтов ультразвуковым методом.

Для каждого из образцов определены пористость, коэффициент пористости, естественная влажность, объемный вес сухого грунта, степень влажности, а также скорости продольных волн V_p в естественном напряженном состоянии, то есть без дополнительного статического давления.

Для проведения исследований подготовленный образец грунта в кольце помещали на экспериментальный стенд и устанавливали две мессуры для регистрации величины деформации лессового грунта при различных статических нагрузках. Первая ступень нагрузки задавалась равной 0,05 МПа, при этом измерялась скорость V_p и величина деформаций S_{mm} , грунт выдерживался при этой нагрузке до полной стабилизации деформаций. Затем вновь измерялась величина деформации S_{mm} и скорости волн V_p . Далее нагрузка увеличивалась ступенями по 0,1 МПа с последующим измерением величин деформаций S_{mm} и скорости V_p . К концу эксперимента нагрузка доводилась до 0,6 МПа, а затем постепенно уменьшалась в обратном порядке, при этом на каждой ступени измерялись скорости волн V_p в двух направлениях, а упругие деформации фиксировались. Для получения более точных и достоверных данных все эксперименты повторялись несколько раз по монолитам с каждой глубины.

Ниже приведены некоторые результаты исследований на монолитах грунтов двух площадок г.Ташкента.

У грунтов с обеих площадок при различных влажностях, с увеличением статической нагрузки (давления), величины скоростей продольных волн постепенно возрастают и вследствие уменьшения пористости и возрастания плотности грунтов происходит увеличение общей площади контактов между частицами.

Эмпирическая зависимость $V_p=f(p)$ может быть выражена в виде:

$$V_p = V_0 + ap^b \quad (1)$$

Здесь V_p – скорость продольных волн при фиксированной статической нагрузке, м/с; V_0 – то же, при $p=0$; p – давление, МПа; a, b – эмпирические коэффициенты.

В качестве примера приведем разрез шурфа I, где выделяются четыре литологические разности: на глубинах 0-2м суглинок легкий, 2-5м погребенная почва, 5-7м супесь легкая, 7-12м суглинок тяжелый. На глубине 4 и 5м естественная влажность соответственно 0,092 и 0,118. Выполнена статистическая обработка опытных данных и найдены зависимости скорости волн V_p от давления в интервале 0,1-0,6 МПа (табл.1).

<i>Таблица 1.</i>				
Статистические зависимости скорости волн V_p от давления на глубине 4-5 м				
№ п/п	№ выработки	Глубина отбора образцов, м	Уравнение аппроксимирующей кривой	Среднеквадратическое отклонение
1	III-1	4	$V_p = 498 + 70 p^{0,58}$	16,91
2	III-1	5	$V_p = 390 + 85 p^{0,54}$	8,4

Горизонт супеси легкой. Образцы отобраны на глубины 6,5 м, влажность грунта 0,13. Результаты экспериментов показали, что скорость волн V_p в горизонтальном направлении больше, чем в вертикальном. Авторами получена зависимость скорости волн V_p от давления в интервале 0,1-0,6 МПа для супеси легкой:

$$V_p = 460 + 109p^{0,42} \quad (2)$$

Среднеквадратическое отклонение $S_v = 6,4$.

Горизонт суглинка тяжелого. Результаты экспериментов на образцах, отобранных с глубины 8...12 м, показали, что при естественной влажности 0,135...0,24, скорости волн V_p от 375 до 850 м/с. Зависимость скорости волн V_p от давления в интервале 0,1-0,6 МПа для этих грунтов приведены (табл. 2).

<i>Таблица 2.</i>				
Статистические зависимости скорости волн V_p от давления на глубине 8-12 м				
№№ п/п	№ выработки	Глубина отбора образцов, м	Уравнение аппроксимирующей кривой	Среднеквадратическое отклонение
1	Ш-1	8	$V_p = 665 + 2,24p^{2,25}$	20,6
2	„„	9	$V_p = 592 + 43,6p^{0,96}$	11,7
3	„„	10	$V_p = 448 + 149p^{0,29}$	3,3
4	„„	11	$V_p = 508 + 100p^{0,44}$	4,7
5	„„	12	$V_p = 380 + 147p^{0,37}$	11,6

Изучена также зависимость скорости волн V_p от осадки грунтов. Установлено, что с повышением величины осадки возрастают скорости волн V_p . Это обусловлено уменьшением пористости, увеличением объемного веса, уплотнением грунта. При проведении эксперимента выявлены зависимости скорости волн V_p от пористости лессовых грунтов по **шурфу 1**. Зависимость скорости волн V_p от пористости (а не от осадок) обратно пропорциональная, для данных грунтов и приближенно описывается формулой вида:

$$v_p = v_0 + a(n_0 - n)^b \quad (3)$$

Здесь v_p – скорость продольных волн, м/с, v_0 – то же при $p=0$; n_0 – пористость при $p=0$; n – пористость. Соответственно пористость при статическом давлении, равном нулю – n_0 . a , b – эмпирические коэффициенты.

Аналогичные эксперименты проведены по образцам из остальных шурфов. В ходе экспериментальных исследований, одновременно изучены по двум шурфам **анизотропные свойства грунтов**. Установлено, что коэффициент анизотропии скорости волн V_p не зависит от влажности грунта.

Коэффициент анизотропии скорости продольных волн V_p в лессовых грунтах в общем случае обусловлен составом, структурой, пористостью, и генетическим типом грунтов. Результаты проведенных экспериментальных исследований ультразвуковым методом показывают, что на изученной территории на всех глубинах анизотропии скорости волн V_p не выявлено. Таким образом, исследуемая толща по этому параметру является изотропной.

Заключение

В лессовых грунтах для каждого из парагенетических комплексов влаги скорости волн V_p в вертикальном и горизонтальном направлении при определенной нагрузке одинаковы.

Скорость волн V_p с увеличением давления возрастает в лессовых грунтах с темпом 25-35 м/с на 0,1 МПа, что объясняется уменьшением пористости на 0,01-0,015. При последующей разгрузке скорость волн V_p постепенно увеличивается и почти восстанавливается первоначальное значение. Это происходит во всех диапазонах изученной влажности.

Выявлено что сейсмические свойства лессовидных тяжелых суглинков сильно отличаются от грунтов других горизонтов, при естественной влажности в диапазоне от 0,135 до 0,24 скорости волн V_p колеблются в пределах от 375 до 850 м/с.

Результаты лабораторных исследований показывают, что после разгрузки скорости волн V_p по всем образцам сохраняют высокие значения. Измерения в ходе разгрузки показывают существенное остаточное уменьшение пористости и увеличение объемного веса.

При подтоплении застроенных территории, сейсмические свойства лессовых грунтов улучшаются, уменьшается пористость, и образуется новая структура. Для того, чтобы определить, настолько улучшаются сейсмические свойства лессовых грунтов застроенных и подтопленных территорий, необходимо проводить дополнительные специальные полевые исследования, что позволит уточнить параметры сейсмического микрорайонирования.

Литература

1. Мушкетов И.В. *Физическая геология. Т.1. Общие свойства и состав Земли, тектонические процессы.* Изд. 2-е, СПб. 1899, 784 с.
2. Голицын Б.Б. *Лекции по сейсмометрии СПб. 1912, 654с.*
3. Горяинов Н.Н. Ляховицкий Ф.М. *Сейсмические методы в инженерной геологии.* Изд-во «Недра». М.:1979, 142с.
4. Кожевников А.Д. *О сейсмическом микрорайонировании на лессовых грунтах. Инж. Изыскания в строительстве. Реф. Сб. Сер. II (ЦИНИС, 1976, вып.1 (42), с.11-16.*
5. Кожевников А.Д. *Изменение сейсмических свойств лессовых грунтов при обводнении территорий. Автореф. Дисс. к.г.м.н. М.:1977, 21с.*
6. Кригер Н.И., Миндель И.Г., Кожевников А.Д. *Сейсмические свойства лессовых пород. Тр. ПНИИИС.-: Стройиздат. 1978. вып. 57, с.5-26.*
7. Кригер Н.И., Алешин А.С. и др. *Сейсмические характеристики лессовых пород в связи с геологическим окружением и техногенезом. М. :Наука, 1980, 103с.*
8. Хамраев Б. *Изменение сейсмических свойств лессовых грунтов при подтоплении /Автореф. дисс. ... канд. г.-м. наук. М., ПНИИИС. 1992, 27 с.*

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧЕНИЯ ГРУНТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЮВИАЛЬНЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ НА ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

А.Г. Барановский

ООО «РИТОС», г.Челябинск, ул. Комарова, 112а.
E-mail: geologia85@mail.ru

Согласно СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть III. Правила производства работ в районах распространения специфических грунтов» к элювиальным грунтам следует относить грунты, образовавшиеся в результате процессов выветривания горных пород на месте их залегания без заметных признаков смещения.

Элювиальные глинистые грунты пользуются на Урале широким пространственным распространением и относятся к древней мезозойской коре выветривания.

Впервые коры выветривания в регионе исследовались И.М. Крашенинниковым в 1915 г. [3]. Неоценимый вклад в изучение инженерно-геологических свойств элювиальных грунтов Уральского региона внесли С.Г. Дубейковский [1], Л.И. Подкорытова [1], Т.К. Костерова [1], Л.И. Корженко [2], Ю.В. Сырокомский [5], К.Г. Пшеничников [5], В.Б. Швец [6], Л.А. Ярг [7, 8] и др. В пределах г.Челябинска работы по оценке изменения физико-механических свойств элювиальных грунтов велись В.П. Маричевым [4].

Анализируя результаты определения физико-механических свойств грунтов, многие авторы не учитывают зависимости их прочностных и деформационных характеристик от условий проведения лабораторных испытаний (компрессионного сжатия, одноплоскостного среза).

В статье рассматривается влияние условий проведения лабораторных испытаний элювиальных глинистых грунтов на их механические свойства.

Актуальность проведенных исследований опирается на практический опыт и на требования действующих нормативных документов.

Согласно п. 5.3.4 СП 22.13330.2016 «СНиП 2.02.01-83* Основания зданий и сооружений» характеристики грунтов природного сложения, а также искусственного происхождения следует определять для сооружений геотехнической категории 2 и 3 на основе их непосредственных испытаний в полевых и лабораторных условиях с учетом возможного изменения влажности грунтов в процессе строительства и эксплуатации сооружений. Для определения прочностных характеристик грунтов f и c , в которых прогнозируется повышение влажности, образцы грунтов предварительно насыщают водой до значений влажности, соответствующих прогнозу.

В соответствии с ГОСТ 12248.1-2020 «Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза» и ГОСТ 12248.4-2020 «Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия» для лабораторных испытаний используют образцы грунта с природной (естественной) влажностью или в водонасыщенном состоянии.

На практике обычно принято, что если грунты залегают ниже уровня подземных вод (УПВ), то они находятся в водонасыщенном состоянии и производить их дополнительное водонасыщение нет смысла, в этом случае лабораторные испытания проводят при естественной влажности.

Для подтверждения или опровержения данного утверждения автором произведена аналитическая обработка лабораторных испытаний свойств элювиальных глинистых грунтов на 10 площадках г.Челябинска.

На каждой площадке были отобраны образцы грунта ненарушенной структуры из толщи элювиальных глинистых образований мезозойской коры выветривания гранитоидов в разных микрорайонах г.Челябинска и прилегающей к городу территории.

Исследуемые грунты залегают ниже УПВ. Лабораторные испытания, в пределах данных площадок, произведены методами компрессионного сжатия и одноплоскостного среза при природной (естественной) влажности и при водонасыщении.

В геоморфологическом отношении район исследований представляет собой отпрепарированный Зауральский пенеплен.

В геологическом отношении изучаемая территория относится к области развития гранитоидных интрузий Челябинского массива, приуроченного к сложной складчатой структуре вмещающих пород, разрушенных процессами выветривания до глинистых грунтов.

Разведанный разрез района исследования представлен, в основном, остаточными дисперсными корами выветривания гранодиоритов, с реликтами в разной степени разрушенных материнских пород, неравномерно обогащенными крупнообломочным материалом (щебень и дресва кварца), с кварцевыми прожилками.

Дисперсная кора выветривания коренных пород довольно однородная, слабоструктурная, с включениями крупнообломочного материала от 4% до 15%, с глубины 11,0-12,5 м встречаются гнезда полускальных грунтов и прочноструктурных суглинков.

Понижения в кровле элювиальных глинистых грунтов выполнены континентальными песчано-глинистыми отложениями олигоцен-плиоценовой субформации. Вышеперечисленные отложения перекрыты покровными суглинками делювиального генезиса малой мощности. С поверхности территория задернована почвенно-растительным слоем.

Уровни подземных вод вскрыты на глубинах 1,0-6,5 м.

Пространственное расположение исследуемых площадок отражено на Рис. 1.

Результаты аналитической обработки физико-механических свойств по площадкам приведены в табл. 1 и 2.

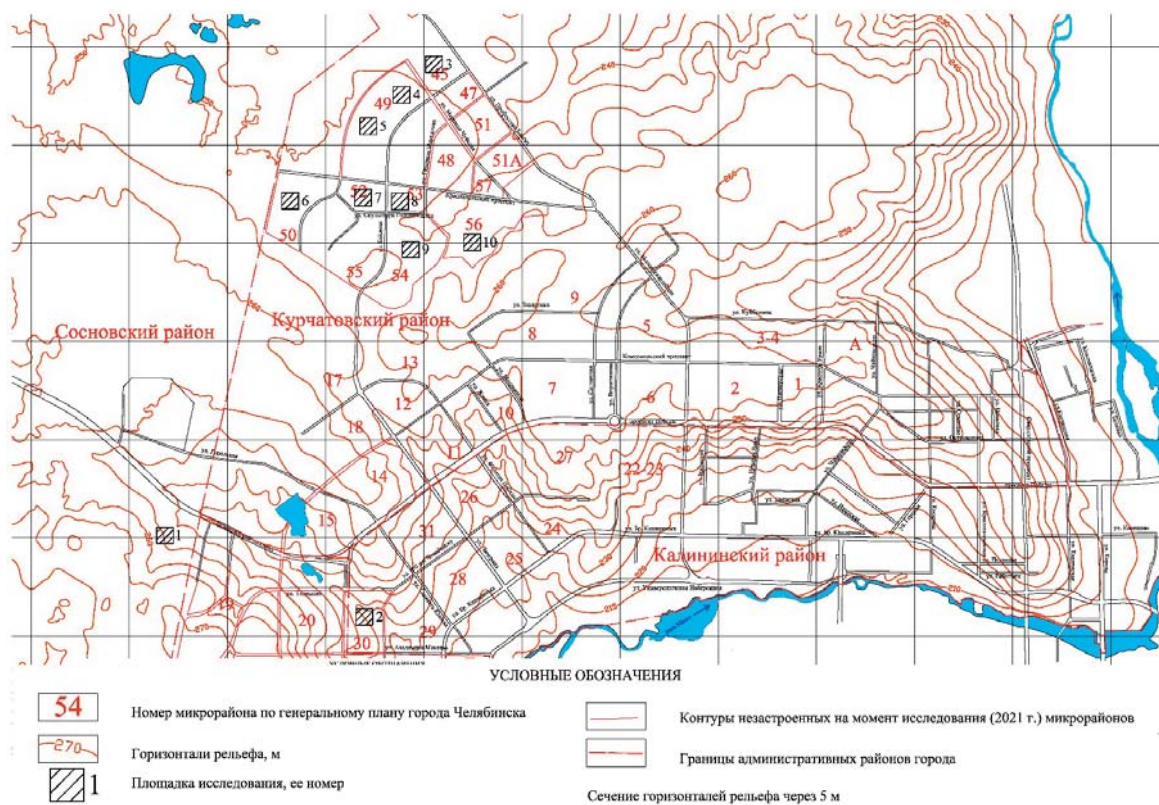


Рис. 1. Картосхема пространственного расположения исследуемых площадок.

Перед началом проведения лабораторных испытаний механических свойств элювиальных глинистых грунтов (для каждой площадки) были определены их физические характеристики и гранулометрический состав. Результаты расчета нормативных значений физических свойств элювиальных образований и их гранулометрического состава показали, что выделенные разновидности грунтов, подлежащие испытанию при разных лабораторных условиях, в пределах одной площадки,

Таблица 1.

Нормативные значения физико-механических свойств элювиальных глинистых грунтов

Номер площадки	Расположение площадки – микрорайон	Разновидность элювиальных глинистых грунтов	Показатели свойств элювиальных глинистых грунтов														
			плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³	плотность грунта ρ , г/см ³	плотность сухого грунта ρ_d , г/см ³	природная влажность ω , %	коэффициент пористости e , д.ед.	влажность на границах, %	раскатывания W_p	текучести W_L	число пластичности I_p , %	показатель текучести I_L , д.ед.	коэффициент водонасыщения S_r , д.ед.	условие проведения сдвиговых испытаний	удельное сцепление c , кПа	угол внутреннего трения f , град.	условие проведения компрессионных испытаний
1	«Ласковый»	Глина твердая	2,68	1,88	1,47	28	0,84	48	28	20	-0,02	0,90	1	49	15	1	2,6
			2,70	1,87	1,46	28	0,85	48	28	21	0,02	0,88	2	34	14	2	2,0
2	30	Суглинок твердый	2,70	1,90	1,52	25	0,78	39	25	14	0,03	0,87	1	50	18	1	4,1
			2,70	1,90	1,50	26	0,80	41	25	14	0,01	0,88	2	38	17	2	3,8
3	45	Глина твердая	2,74	1,96	1,67	18	0,65	39	22	18	-0,22	0,76	1	65	22	1	3,1
			2,73	1,95	1,65	19	0,68	40	24	18	-0,34	0,75	2	48	20	2	2,9
4	49б	Суглинок твердый	2,68	1,86	1,49	25	0,80	34	20	14	0,36	0,84	1	43	21	1	3,0
			2,67	1,86	1,51	23	0,78	32	19	13	0,37	0,81	2	40	20	2	3,0
5	49в	Суглинок полутвердый	2,68	1,91	1,55	22	0,73	35	21	14	0,11	0,83	1	37	19	1	3,3
			2,70	1,86	1,52	23	0,78	35	21	14	0,17	0,79	2	28	18	2	3,3
6	50	Суглинок полутвердый	2,65	1,84	1,51	23	0,77	35	21	14	0,14	0,78	1	46	16	1	3,2
			2,64	1,79	1,48	21	0,79	36	21	15	0,02	0,71	2	41	15	2	3,2
7	52	Суглинок твердый	2,75	1,95	1,54	25	0,79	43	26	17	-0,12	0,89	1	53	23	1	3,3
			2,77	1,94	1,56	24	0,77	43	26	17	-0,16	0,85	2	46	21	2	2,3
8	53	Суглинок твердый	2,72	1,90	1,54	24	0,77	41	27	14	-0,23	0,82	1	35	24	1	4,2
			2,71	1,88	1,50	26	0,82	45	28	16	-0,14	0,85	2	27	24	2	3,2
9	54	Глина твердая	2,73	1,89	1,51	25	0,81	42	28	15	-0,20	0,84	1	33	24	1	4,1
			2,73	1,87	1,48	27	0,85	45	29	15	-0,15	0,86	2	30	22	2	3,7
10	56	Суглинок твердый	2,73	1,92	1,55	24	0,77	47	27	20	-0,17	0,85	1	44	23	1	5,2
			2,72	1,91	1,54	24	0,77	48	27	21	-0,16	0,85	2	37	22	2	4,9
			2,74	1,85	1,45	28	0,89	43	28	15	-0,02	0,85	1	33	19	2	3,0
			2,76	1,88	1,50	26	0,85	40	27	13	-0,11	0,83	2	31	18	1	3,0

Примечание: Цифра в графах «условие проведения сдвиговых испытаний» и «условие проведения компрессионных испытаний»: 1 – испытание проводилось при природной (естественной) влажности; 2 – при водонасыщении.

Таблица 2.								
Гранулометрический состав элювиальных глинистых грунтов								
Номер площадки	Расположение площадки – микрорайон	Разновидность элювиальных глинистых грунтов	Размер слагающих грунт элементов, мм					
			>10	10-2	2-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,1
1	«Ласковый»	Глина твердая	0,0	10,8	7,2	82,0		
			0,1	10,5	5,1	84,3		
		Суглинок твердый	0,1	11,6	8,4	79,9		
			0,7	9,1	6,7	83,5		
2	30	Глина твердая	0,0	14,0	7,8	78,2		
			0,2	15,0	10,0	74,8		
3	45	Суглинок твердый	0,0	4,0	1,0	95,0		
			0,0	4,0	1,0	95,0		
4	49б	Суглинок полутвердый	2,2	14,0	10,0	73,8		
			0,0	9,8	11,5	78,7		
5	49в	Суглинок полутвердый	0,0	6,2	28,5	9,2	8,7	47,5
			0,0	5,8	30,3	8,8	7,1	48,0
6	50	Суглинок твердый	3,0	5,9	5,6	85,5		
			5,2	8,0	8,4	78,4		
7	52	Суглинок твердый	1,2	8,7	7,3	82,8		
			0,6	6,8	12,9	79,7		
8	53	Суглинок твердый	0,0	8,3	8,7	82,9		
			0,0	8,0	7,5	84,5		
9	54	Глина твердая	0,0	9,1	5,8	85,1		
			0,2	10,9	5,3	83,6		
10	56	Суглинок твердый	0,0	8,4	4,9	86,7		
			0,0	7,3	4,9	87,8		

схожи по основным показателям. Разность значений не превышает среднего квадратического отклонения.

Аналитическая обработка результатов испытаний механических свойств позволила установить, что на 8 площадках из десяти при полном водонасыщении произошло уменьшение удельного сцепления (с) элювиальных глинистых грунтов, на 7 площадках из десяти ухудшились деформационные (Ек) характеристики грунта.

Из информации, отраженной в табл. 1 и 2 заметно, что чем больше процентное содержание щебня и дресвы кварца в исследуемых грунтах, тем больше изменяются значения прочностных и деформационных характеристик грунта при условии проведения лабораторных испытаний элювиальных глинистых образований в водонасыщенном состоянии.

Ухудшение механических характеристик элювиальных глинистых грунтов, залегающих ниже УПВ при водонасыщении связано, по мнению автора, с изменением природной влажности грунта до начала проведения лабораторных испытаний.

Изменение природной влажности обусловлено двумя факторами:

- гранулометрический состав грунта. При отборе монолита элювиального глинистого грунта из массива он изменяет, в меньшую сторону, свою природную влажность после отбора и подъема образца грунта на поверхность. Потеря влажности грунта тем больше, чем больше содержится в образце крупнообломочного материала (щебня и дресвы);

- изменение природной влажности образца грунта после его подъема на поверхность и до начала проведения лабораторных испытаний, обусловленное условиями транспортировки, хранения, целостности упаковки монолита и протяженностью времени от момента подъема образца грунта на поверхность до начала его лабораторного исследования.

Таким образом, можно констатировать, что лабораторные испытания элювиальных глинистых грунтов, залегающих ниже УПВ, следует проводить в водонасыщенном состоянии, а не при природной (естественной) влажности.

Данное утверждение основано как на настоящих исследованиях, так и на требованиях СП 22.13330.2016.

Литература

1. Дубейковский С.Г., Сырокамский Ю.В., Костерова Т.К., Подкорытова Л.И. Комплексное изучение состава, строения и свойств элювиальных грунтов Урала в инженерно-геологических целях // В сб.: *Гидрогеология и инженерная геология Урала. Вып. 1. Свердловск, 1976. 52 с.*
2. Корженко Л.И. Основания и фундаменты в условиях Урала. Свердловск: Свердл. кн. изд-во, 1963. 153 с.
3. Крашенинников И.М. Древняя кора выветривания лесостепного Зауралья / И.М. Крашенинников // *Изв. Докучаевской почвенной комиссии. -М., 1915. №3.-С. 18-24.*
4. Маричев В.П. Взаимосвязь инженерно-геологических свойств элювиальных глинистых грунтов. // В сб.: *Гидрогеология и инженерная геология Урала, вып. 1, Свердловск, 1976. с. 69-75.*
5. Сырокомский Ю.В., Пшеничников К.Г., Подкорытова Л.И. Инженерно-геологические особенности элювиальных грунтов Свердловска // *Инженерная геология, 1979, №2. С. 87-96.*
6. Швец В.Б. Элювиальные грунты как основания сооружений. М., Стройиздат, 1993. 224 с.
7. Ярг Л.А. Изменение физико-механических свойств пород при выветривании. М.: Недра, 1974. 144 с.
8. Ярг Л.А. Методы инженерно-геологических исследований процесса и кор выветривания, М., Недра, 1991. 139 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ ГИДРОТЕРМАЛЬНО ИЗМЕНЕННЫХ ПОРОД С ПОМОЩЬЮ МОЛОТКА ШМИДТА (БОЛЬШОЙ СЕМЯЧИК, КАМЧАТКА)

И.Е. Большаков¹, Е.С. Житова², А.А. Нуждаев²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, г.Москва, Ленинские горы, д.1. E-mail: bolshakov.ilya.210@yandex.ru

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, г.Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9. E-mail: zhitova_es@mail.ru, anton.ikys@bk.ru

Введение

В современном мире в связи с повышенным вниманием к альтернативным источникам энергии все больше внимания уделяется изучению геотермальных ресурсов Земли. В Российской Федерации наиболее перспективными регионами в отношении использования геотермальных ресурсов являются Курильские острова и полуостров Камчатка, где функционируют 3 геотермальных электростанции с суммарной установленной мощностью 74 МВт. Однако, в Курило-Камчатском регионе существует множество еще не освоенных геотермальных месторождений с множеством поверхностных термопроявлений. Одним из таких районов является вулканический массив Большой Семячик, расположенный в 10 км на юго-запад от широко известной Долины Гейзеров.

Изучение свойств гидротермально измененных грунтов является весьма актуальной задачей в связи с тем, что они зачастую служат основаниями для геотермальных электростанций и вспомогательных сооружений, а также слагают склоны в районах туристических маршрутов, что требует особого внимания в связи с активизацией склоновых процессов в ослабленных гидротермальными преобразованиями зонах. Например, в Долине Гейзеров и на Мутновском вулкане на Камчатке в зонах распространения гидротермально измененных пород уже происходили масштабные оползни и обвалы, приводившие к разрушению туристических троп и ряда природных достопримечательностей.

Термальные поля и другие области распространения гидротермально измененных пород обладают высокой пространственной изменчивостью пород и их свойств, что делает крайне актуальным использование простых и быстрых полевых методов, таких как определение высоты упругого отскока с помощью молотка Шмидта для определения их свойств. В мировой практике этот метод широко используется для различных видов горных пород [8, 9], однако в России его использование регламентировано лишь для бетонов.

Объектом исследования данной работы являются гидротермально измененные породы термальных полей массива Большой Семячик. Цель работы – определение возможности применения молотка Шмидта для оценки свойств гидротермально измененных пород и выявление взаимосвязи между высотой упругого отскока, определенной при помощи молотка Шмидта и свойствами опализированных пород.

Характеристика объекта исследования

Впервые горячие источники Семячинской гидротермальной системы были описаны С.П. Крашенинниковым в 1755 г. в книге «Описание земли Камчатки». Позже, исследования в этом районе проводились Б.И. Пийпом [4], Т.И. Устиновой [5], и другими геологами. Самые длительные и масштабные работы были проведены под руководством В.В. Аверьева и Е.А. Вакина в 1965 г. [1]. В процессе тех исследований было произведено уточнение геологического строения, подробная термосъемка и оконтуривание поверхностных термопроявлений с замеров расходов и определением состава основных источников термальных вод и пара, а также, ряд сопутствующих исследований.

Вулканический массив Большой Семячик расположен в пределах Восточного вулканического пояса Камчатки в 10 км от побережья Тихого океана. Ближайшими вулканическими постройками являются Кихпинич, Узон и Тауншиц на севере и Малый Семячик на юго-западе. В пределах массива выделяется множество отдельных построек различного типа и возраста, как относительно молодые экструзивные купола, так и существенно более древние доледниковые стратовулканы.

Внутри массива находится несколько термальных полей, крупнейшими из которых являются: Верхнее термальное поле вулкана Бурлящий, Парящая Долина и термальное поле Северного кратера

Центрального Семячика (Рис. 1). В данной работе изучены образцы с первого и последнего из вышеперечисленных термальных полей. Оба исследованных термальных поля характеризуются разгрузкой кислых термальных вод, под действием которых активизируется процесс кислотного выщелачивания вулканогенных пород, приводящий к образованию опалитов. С минералогической точки зрения этот процесс неплохо изучен [2, 3, 10], но влияние опализации на свойства пород, за исключением единичных работ [6] все еще изучено слабо.



Рис. 1. Северная часть массива Большой Семячик с вершины Центрального Семячика.

Оба термальных поля, вероятно, находятся в регрессивной стадии развития, так как границы областей гидротермально измененных пород значительно шире, чем границы современных прогретых участков. Несмотря на это, на Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий температура парогазовых струй достигает 137° , а три самые мощные струи суммарно выносят около 3 кг пара в секунду [1].

Фактический материал

В ходе совместных с лабораторией минералогии ИВиС ДВО РАН полевых работ в 2020 г. на двух термальных полях были отобраны коллекции образцов различной степени измененности, которые включали в себя как неизменные андезиты и андезито-базальты, так и полностью преобразованные опалиты. Образцы отбирались из обнажений в различных частях полей и за их пределами. С каждого термального поля было отобрано по 7 образцов, из которых частично в лабораторных, а частично в полевых условиях были подготовлены цилиндры, необходимые для проведения измерений (Рис. 2). Неизменные образцы с Верхнего термального поля вулкана Бурлящий представлены андезито-базальтами, а с Центрального Семячика – андезитами. По результатам исследований состава и строения были выделены ряды изменения, изображенные на Рис. 2.

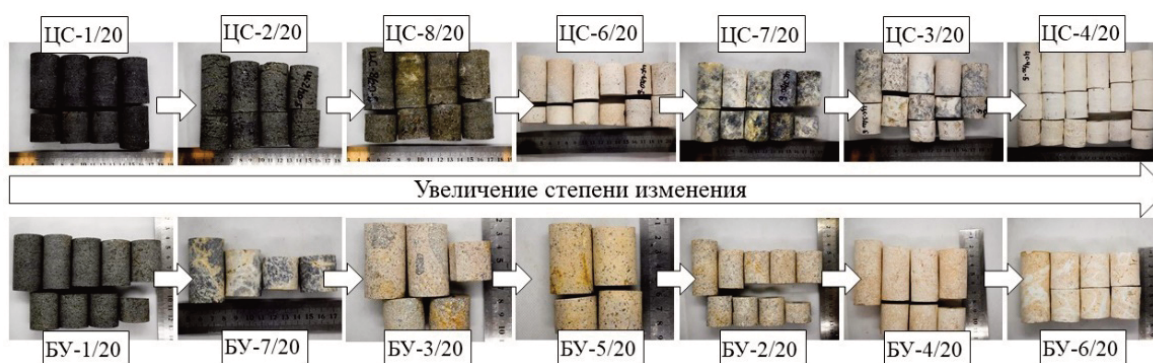


Рис. 2. Образцы исследованных пород, выстроенные в порядке увеличения степени измененности с термальных полей: Северного кратера Центрального Семячика (сверху) и Верхнего поля вулкана Бурлящий (снизу).

С целью определения корреляционных зависимостей в лабораторных условиях были изучены свойства 123 цилиндров, подготовленных из 14 образцов, а каждое из 14 обнажений было исследовано молотком Шмидта (по 20 ударов).

Методика исследования

Определение свойств пород лабораторными методами. Для всех образцов были определены (измерены или рассчитаны) следующие показатели физических и физико-механических свойств: плотность воздушно-сухого грунта (ρ), плотность водонасыщенного грунта ($\rho_{\text{вод}}$), плотность твердых частиц (ρ_s) (прибор В.Я.Калачева ПЭЛа), пористость (n), водопоглощение (W_n), открытая пористость (n_o), магнитная восприимчивость (χ), скорость продольных и поперечных волн по оси цилиндров в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях ($V_p, V_s, V_{pв}, V_{sв}$) (метод ультразвукового просвечивания, прибор «Ультразвук»), коэффициент Пуассона по оси цилиндра ($\mu_{\text{дин}}$), динамический модуль упругости по оси цилиндра ($E_{\text{дин}}$), прочность на одноосное сжатие и на разрыв в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях ($R_c, R_{cв}, R_p, R_{pв}$) (Пресс ИП-1А-1000 с максимальной нагрузкой 100т), коэффициент размягчаемости (K_p). Все определения были поведены по стандартным методикам [7].

Петрографические исследования были выполнены с целью уточнения положения образцов в выделенном ряду изменения. Состав и строение пород изучались в прозрачных шлифах, приготовленных из каждого образца с использованием оптического поляризационного микроскопа Olympus BX41.

Определение прочности с помощью молотка Шмидта. Дополнительно при отборе образцов производилось изучение обнажений при помощи молотка Шмидта (тип N) RGK SK-60 (Рис. 3). Для каждого исследуемого участка было произведено 20 измерений, что позволило рассчитать нормативные значения упругого отскока в соответствии с методиками, изложенными в ГОСТ 22690-2015 и ISRM. Согласно требованиям, ГОСТ 22690-2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля», необходимо произвести не менее 10 ударов с расстоянием между точками не менее 3 см и расстояние до края должно превышать 5 см. Итоговое значение в данном случае получается путем вычисления среднего из всех измерений. Методика, описанная в ISRM предполагает не менее 20 ударов, а расчетное значение получают путем вычисления среднего из 10 наибольших значений. Таким образом, при расчете по методике ISRM значения будут превосходить аналогичные полученные по методике ГОСТ.



Рис. 3. Молоток Шмидта RGKSK-60 на обнажении ЦС-3/20.

Пересчет высоты упругого отскока в прочность на одноосное сжатие активно применяется для бетонов в России, а за рубежом и для горных пород. В данной работе расчеты были проведены при помощи корреляционной формулы, предложенной для скальных грунтов различного генезиса в работе [9]:

$$UCS = 0.1383 * R_L^{1.743},$$

где R_L – высота упругого отскока, полученная при помощи молотка Шмидта типа L.

Данное уравнение было выбрано для расчетов, так как в процессе первичной оценки данных показало наилучшие результаты сходимости с прочностями на одноосное сжатие, полученными прямым методом.

При этом величина R_L была получена из R_N путем пересчета по формуле [8]:

$$R_L = (R_N - 2,5687) / 1,0642,$$

где R_N – высота упругого отскока, полученная при помощи молотка Шмидта типа N.

Корреляция высоты упругого отскока со свойствами гидротермально измененных пород

В результате всех проведенных определений была составлена сводная таблица свойств (табл.1). В ней для каждого образца приведены средние значения основных показателей свойств. По результатам анализа этой таблицы и более полной ее версии был составлен ряд графиков, позволивший выявить явную корреляционную связь высоты упругого отскока с различными свойствами. Во всех приведенных графиках использовалась высота упругого отскока, вычисленная согласно методике ГОСТ, как среднее из 20 проведенных измерений. Одной из самых явных полученных взаимосвязей является зависимость высоты упругого отскока от пористости пород (Рис. 4).

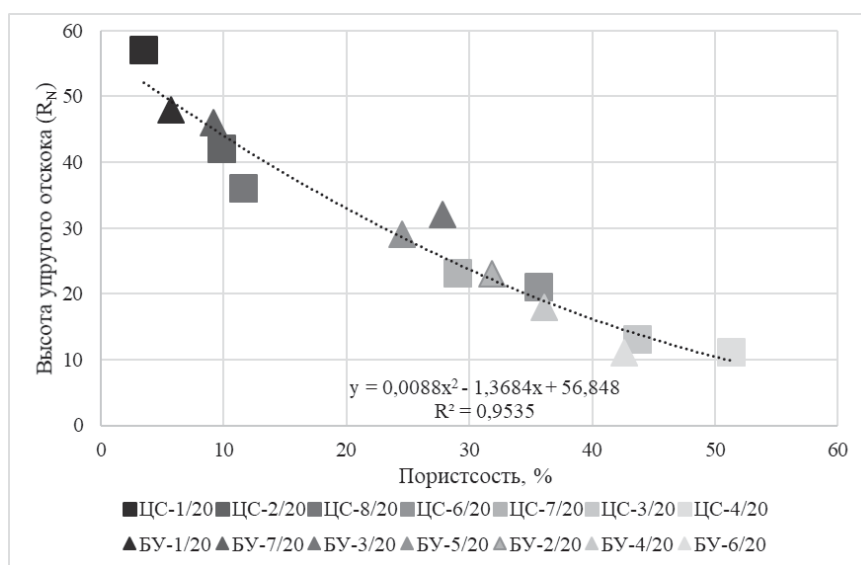


Рис. 4. График зависимости высоты упругого отскока от пористости.

В процессе опализации основным процессом является выщелачивание, за счет которого пористость изучаемых пород значительно возрастает и может превышать 50%. Из приведенного графика отлично видно, что пористость, являющаяся своеобразным индикатором степени измененности пород в условиях кислотного выщелачивания, тесно связана с высотой упругого отскока, причем взаимосвязь является практически линейной.

Тесную взаимосвязь с высотой упругого отскока имеют также плотность, скорость упругих волн, динамический модуль упругости и прочностные свойства (Рис. 5). Причем, взаимосвязь плотности и скорости продольных волн с высотой упругого отскока (Рис. 5а,б), видимо, является линейной. В то же время, динамический модуль упругости и прочность на одноосное сжатие связаны с высотой упругого отскока нелинейной зависимостью, которая достаточно точно характеризует изменение свойств сильноизмененных пород в области небольших значений высоты упругого отскока, а в области высоких значений и слабой степени изменения разброс заметно увеличивается. Скорее всего такое изменение связано с тем, что по мере увеличения степени изменения состав и строение пород становятся все более схожими, из-за чего изначальные особен-

Таблица 1.

Показатели физико-механических свойств исследованных пород									
Увеличение измененности	№ образца	Плотность воздушно-сухого грунта, г/см ³	Пористость, %	Открытая пористость, %	Скорость продольных волн по оси зерна (сухие), км/с	Динамический модуль упругости, ГПа	Прочность на одноосное сжатие, МПа	Высота упругого отскока (ГОСТ/ISRM)	Прочность на одноосное сжатие по молотку Шмидта (ГОСТ/ISRM), МПа
↓	БУ-1/20	2,90	3,54	0,59	5,33	54,41	157,41	57 / 63	127,0/152,3
	БУ-7/20	2,61	9,88	4,18	3,84	29,19	55,17	42 / 45	72,6 / 82,5
	БУ-3/20	2,66	11,64	1,58	4,25	35,96	95,10	36 / 40	54,6 / 66,4
	БУ-5/20	1,40	35,70	25,13	2,46	7,08	21,71	21 / 23	19,4 / 23,2
	БУ-2/20	1,56	29,12	17,62	2,84	9,47	16,65	23 / 26	23,2 / 29,5
	БУ-4/20	1,24	43,77	34,05	2,22	5,20	11,93	13 / 16	7,2 / 11,2
	БУ-6/20	1,07	51,35	28,94	1,32	1,31	3,27	11 / 13	5,0 / 7,2
↓	ЦС-1/20	2,74	5,70	0,44	5,5	61,41	133,0	48 / 52	92,9 / 107,5
	ЦС-2/20	2,16	9,17	3,27	4,18	27,42	54,47	46 / 49	85,9 / 96,4
	ЦС-8/20	1,79	27,80	13,43	3,31	16,12	33,4	32 / 35	43,7 / 51,8
	ЦС-6/20	1,77	24,52	9,59	3,37	16,25	32,51	29 / 31	36,3 / 41,2
	ЦС-7/20	1,69	31,80	17,56	3,08	13,42	19,50	23 / 24	23,2 / 25,2
	ЦС-3/20	1,60	36,10	21,76	2,70	8,59	17,67	18 / 20	14,3 / 17,3
	ЦС-4/20	1,55	42,59	28,53	2,63	8,71	16,62	11 / 11	5,0 / 5,0

ности пород перестают оказывать значительный эффект и взаимосвязь с высотой упругого отскока становится более четкой.

Наличие подобных взаимосвязей, вероятно, объясняется тем, что пористость в изначально достаточно плотных опализированных вулканогенных породах является своеобразным индикатором степени измененности и оказывает определяющее влияние на свойства. При этом, пористость тесно связана со всеми остальными показателями, приведенными в табл. 1, из-за чего, при наличии взаимосвязи пористости и высоты упругого отскока (Рис. 4), все остальные зависимости оказываются закономерными.

Дополнительно был составлен график сопоставления показателей прочности на одноосное сжатие, полученных прямым методом с показателями прочности, полученных из высоты упругого отскока, определенной согласно ГОСТ по формулам, приведенным выше (Рис. 6). Прямая на данном графике соответствует полностью совпадающим значениям, полученным разными методами. Из графика отчетливо видно, что предложенная выше формула достаточно достоверно помогает определить прочность на одноосное сжатие для сильноизмененных образцов в диапазоне до 40 МПа, но при более высоких значениях прочности, соответствующих наименее измененным образцам, сходимость результатов сильно ухудшается. Вероятно, это связано с большей изменчивостью состава и строения неизмененных пород. Также, большую роль играет уникальность изученных образцов, ведь все предлагаемые в научной литературе формулы являются эмпирическими и выведены на основе анализа определенных выборок образцов горных пород.

Графики на Рис. 6 показывают, что расчет нормативной величины упругого отскока по различным методикам не дает значительной разницы, однако, при расчете прочности из высоты упругого отскока, определенной согласно ISRM, значения увеличиваются пропорционально величине прочности, что в случае рассматриваемых пород приводит к увеличению сходимости в области малых значений и небольшому уменьшению сходимости для образцов с повышенными значениями. В то

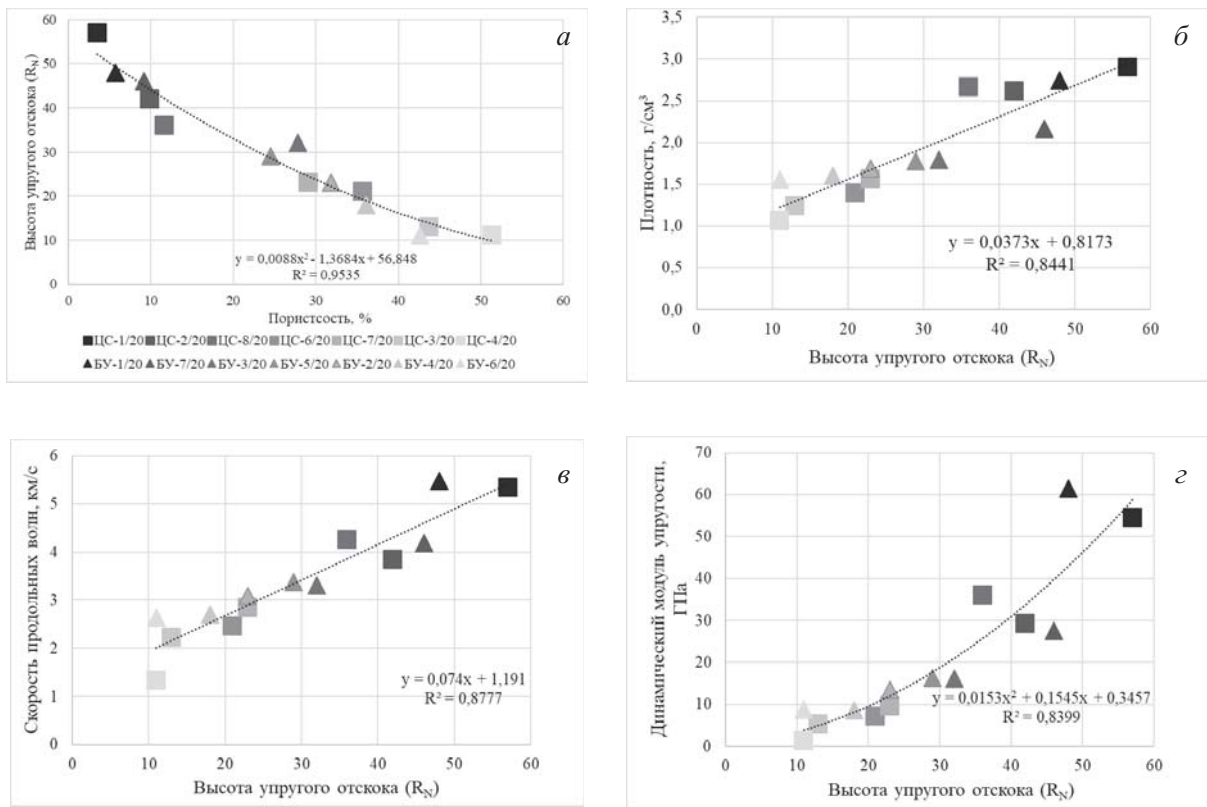


Рис. 5. Зависимости свойств от высоты упругого отскока (RN): а – плотности; б – скорости продольных волн; в – динамического модуля упругости; г – прочности на одноосное сжатие.

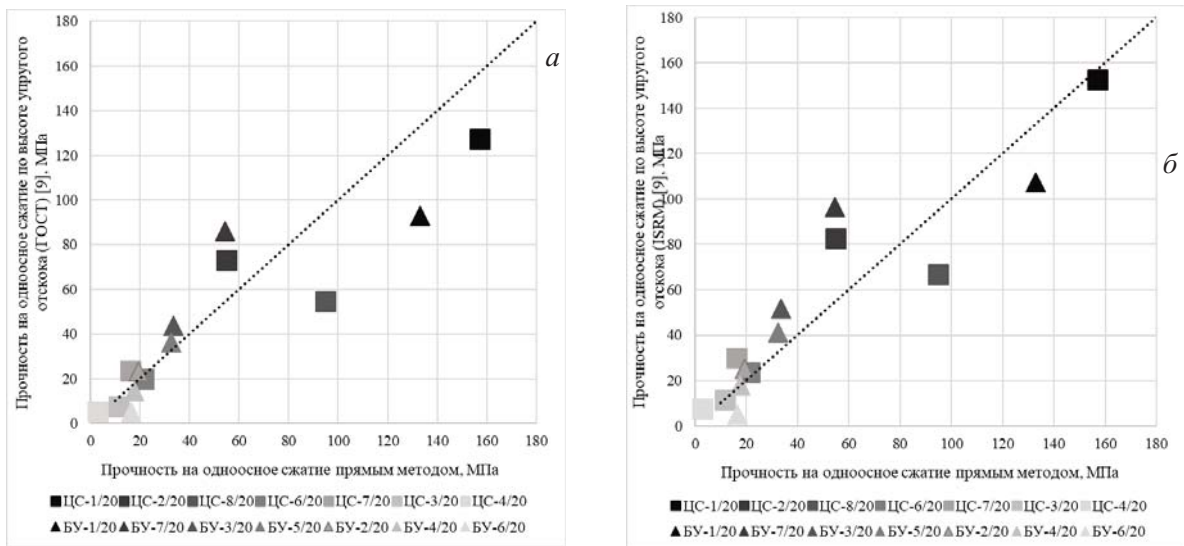


Рис. 6. График сопоставления значений прочности на одноосное сжатие, полученных прямым методом и по высоте упругого отскока, рассчитанной: а - по ГОСТ; б - по ISRM.

же время, эмпирическая формула, полученная для расчета R_c исходя из величины упругого отскока (см. на Рис. 5г), не дает значительного улучшения сходимости результатов что также подтверждает предположение о высокой изменчивости слабо преобразованных пород и постепенном повышении их однородности при увеличении степени опализации.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований выяснено, что высота упругого отскока, полученная при помощи молотка Шмидта тесно связана с физическими и физико-механическими

свойствами эффузивных гидротермально измененных пород. Причем связь оказывается более тесной в породах наибольшей степени изменения, вследствие того, что в процессе опализации, за счет кислотного выщелачивания и частичного отложения вторичных минералов, исходные состав и строение пород полностью меняются и становятся более схожими.

Исходя из полученных закономерностей можно сделать вывод, что в условиях сильной изменчивости геологического строения, которая имеет место на термальных полях, характеризующихся разгрузкой кислых термальных вод, использование молотка Шмидта в качестве косвенного метода определения показателей физических и физико-механических свойств является весьма целесообразным. Выявленные в данной работе взаимосвязи высоты упругого отскока (R_N) с физическими и физико-механическими свойствами позволяют достаточно достоверно оценить свойства пород различной степени измененности еще в полевых условиях.

Следует отметить, что молоток Шмидта можно рекомендовать к использованию для предварительной оценки степени изменения пород.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-35-70008).

Литература

1. Аверьев В.В., Вакин Е.А. Термальные поля вулканического массива Большой Семьячик, — Бюллетень вулканологических станций, АН СССР, 1966 № 42 — С. 3-16.
2. Ероцев-Шак В.А. Гидротермальный субповерхностный литогенез Курило-Камчатского региона — М.: Наука, 1992. — 131 с.
3. Набоко С.И., Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях—М.: АН СССР, 1963, 172 с.
4. Пийп Б.И. Термальные ключи Камчатки // Труды СОПС АН СССР. Сер. Камчатская. 1937. Вып. 2. 268 с.
5. Устинова Т.И. Камчатские гейзеры. — М.: Государственное издательство географической литературы, 1955. — 120 с.
6. Фролова Ю.В., Рычагов С.Н., Чернов М.С., Суровцева К.И., Кузнецов Р.А., Большаков И.Е. Инженерно-геологические аспекты изменения вулканогенных пород в зоне кислотного выщелачивания Южно-Камбальных термальных полей (Южная Камчатка) // Инженерная геология. — 2020. — № 1. — С. 36-51.
7. Фролова Ю.В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения. — КДУ Москва, 2015. — С. 222.
8. Del Potro, R., Hürlimann M.A Comparison of Different Indirect Techniques to Evaluate Volcanic Intact Rock Strength / Rock Mechanics and Rock Engineering 42 (6), 2009, pp. 931–938.
9. Karaman K. Kesimal A. Correlation of Schmidt Rebound Hardness with Uniaxial Compressive Strength and P-Wave Velocity of Rock Materials / Arabian Journal for Science and Engineering 40(7), 2015, pp. 1897–1906.
10. Zimbelman, D.R., Rye R.O., Breit G.N. Origin of secondary sulfate minerals on active andesitic stratovolcanoes / Chemical Geology 215, 2005, pp. 37–60.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОДНОРОДНЫХ ГЛИНИСТЫХ СКЛОНОВ, НАГРУЖЕННЫХ РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ НА ЛОКАЛЬНЫХ УЧАСТКАХ

Ф.Г. Габибов, А.З. Зейналов

Азербайджанский научно-исследовательский институт строительства и архитектуры,
Азербайджан, AZ 1014, г.Баку, ул.Физули, 65. E-mail: farchad@yandex.ru

Представляет большой интерес исследование устойчивости глинистого склона при различных вариантах нагружения поверхности.

Для проведения аналитических исследований выбрана расчетная модель глинистого оползнеопасного склона с геометрическими характеристиками Баилковского склона г.Баку (высота склона $h=80$ м, угол наклона $\beta=30^\circ$).

При решении поставленной задачи были использованы разработанные в ВолгГАСУ на основе метода конечных элементов модели и программы для персонального компьютера (ПК), включающие результаты исследований, приведенных в работах [1, 5], которые позволяют на основе решения плоских задач теории упругости определять напряжения в различных точках грунтового массива от воздействия собственного веса грунтов и различных поверхностных нагрузок, в также наиболее вероятностные поверхности разрушения (НВПР) и величины коэффициентов устойчивости склонов.

В работе [5] на основании точного решения задачи теории упругости для весомой полуплоскости с криволинейной границей и использования методики построения наиболее вероятной поверхности разрушения, форма и расположение которой в приоткосной зоне зависят от напряженного состояния и физико-механических характеристик грунтов, получены формулы для определения коэффициентов устойчивости K однородных откосов и склонов:

при $\lambda \geq 0,1$

$$K = \frac{4}{7}(1 + \mu)(a\lambda + b) \operatorname{tg} \varphi; \quad (1)$$

при $0 < \lambda < 0,1$

$$K = \frac{4}{7}(1 + \mu)\sqrt{10\lambda(d^2 + c\operatorname{tg}^2\beta) + c\operatorname{tg}^2\beta} \operatorname{tg} \varphi \quad (2)$$

Здесь: параметр устойчивости

$$\lambda = \frac{2c}{\gamma h \operatorname{tg} \varphi}; \quad (3)$$

c – сцепление, γ – плотность, φ – угол внутреннего трения, μ – коэффициент бокового давления грунта; h – высота, β – угол откоса; a, b, d – безразмерные коэффициенты, определяемые графиками [5].

Размеры расчетной модели приняты на основании известного положения теории упругости о том, что граничные условия практически не влияют на распределения напряжений, если границы области удалены от рассматриваемой части области не менее чем на шесть ее наибольших размеров.

Исследуемая область разбита на 17900 треугольных элементов, соединенных в 9138 узлах. Разбивка проведена таким образом, чтобы элементы имели наименьшие размеры в исследуемой части области (Рис. 1).

Граничные условия заданы следующим образом: 1) вдоль вертикальных границ расчетной схемы отсутствуют перемещения в горизонтальном направлении; 2) вдоль нижней горизонтальной границы отсутствуют вертикальные перемещения; 3) на перемещения других точек ограничения не наложены.

Исходные данные для решения рассматриваемой задачи включают в себя свойства грунтов (объемный вес g , модуль деформации E , коэффициент бокового давления m , сцепление c и угол внутреннего трения j грунта), поверхностные нагрузки и граничные условия.

При расчетах средние значения физико-механических характеристик грунтов при изменении их относительной влажности от 0,6 до 0,9 приняты равными [4]: 1) для глин и суглинков –

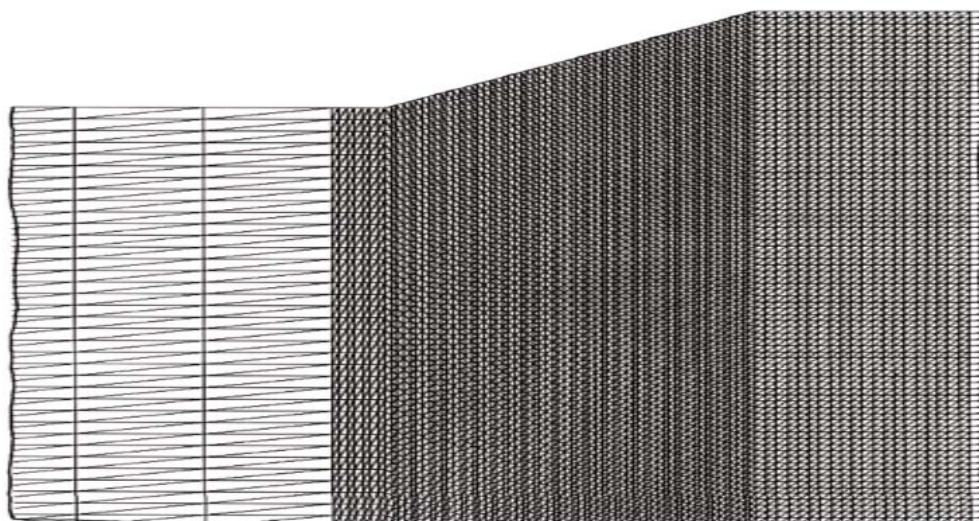


Рис. 1. Разбивка исследуемого склона на треугольные элементы.

$g=1,9 \times 10^4 \text{ Н/м}^3$, $E=48 \text{ МПа}$, $m=0,75$, $c=0,019 \text{ МПа}$, $j=20^0$; 2) для супесей – $g=1,8 \times 10^4 \text{ Н/м}^3$, $E=49 \text{ МПа}$, $m=0,65$, $c=0,011 \text{ МПа}$, $j=34,5^0$.

При этом значения нагрузок q , прикладываемых на отдельные участки поверхности склона изменялись от 0,2 до 0,4 МПа.

На Рис. 2. приведена расчетная схема, а также НВПР склона при $q=0$ (ненагруженный склон) с шириной b возможной призмы обрушения.

По вычисленным на ПК результатам в табличной форме получаются координаты X и Y (м) в точках НВПР; и в этих точках: углы α (градусы) между касательными к линии разрушения и горизонтально; горизонтальные, вертикальные и касательные составляющие напряжений (т/м^2); удерживающие и сдвигающие силы $F_{\text{удер.}}$, $F_{\text{сдвиг.}}$ (т/м^2); горизонтальные и вертикальные перемещения U и V (м), а также работы производимые удерживающими и сдвигающими силами $A_{\text{удер.}}$, $A_{\text{сдвиг.}}$ ($\text{т} \times \text{м}$). В конце таблиц приведены площади эпюр удерживающих и сдвигающих сил, а также суммы их работ и коэффициенты устойчивости склона K .

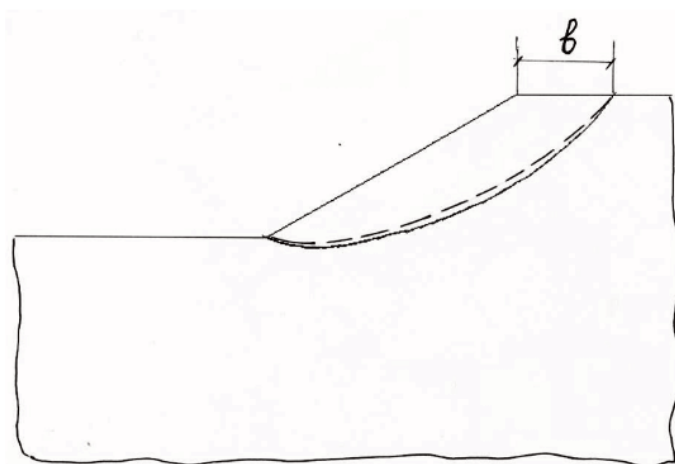


Рис. 2. Расчетная схема нагруженного склона с НВПР (для глины и суглинков сплошная линия, для супеси пунктирная); b – ширина возможной призмы обрушения.

Отметим, что по программе для ПК, используемой в настоящей работе, коэффициент устойчивости склона K вычисляется как отношение удерживающих и сдвигающих сил, действующих вдоль НВПР, и как отношение работ, производимых этими силами при перемещении грунтовых массивов. Второй способ, разработанный проф. В.К. Цветковым, основан на использовании принципа возможных перемещений. Но так как оценка погрешностей при вычислении перемещений методом конечных элементов в настоящее время затруднительна, мы пользовались первым способом, а вто-

рой использовали для страховки правильности полученных результатов. Как показали наши исследования, величины K склона, определяемые двумя указанными способами при различных нагрузках, отличаются друг от друга в среднем всего на 10%.

Прежде чем перейти к описанию и анализу наших исследований приведем ретроспективный анализ предыдущих исследований устойчивости рассматриваемого склона при различных видах нагружений.

В работе [2] также было изучено влияние направления равномерно распределенной нагрузки на устойчивость глинистых склонов. Было выявлено, что изменение угла наклона нагрузки от 0 до 30° приводит к уменьшению коэффициента устойчивости склона K ; для глин (суглинков) в 2,8 раза; для супесей в 2,5 раза. Следовательно, вертикальная равномерно распределенная нагрузка минимально уменьшает устойчивость склона.

В работе [3] была исследована устойчивость глинистых склонов, нагруженных треугольной вертикальной нагрузкой. Треугольная распределенная нагрузка прикладывалась так, чтобы меньший катет треугольника находился в основании склона перпендикулярно дневной поверхности, гипотенуза треугольной нагрузки совпадает с поверхностью склона. При увеличении нагрузки до 0,40 МПа значения коэффициентов устойчивости K увеличиваются для глин и суглинков в пределах 8,2-21,3%, для супесей в пределах 7,7-15,7%. Таким образом если при застройке глинистых склонов отдельные объекты будут создавать на поверхности склона нагрузку идентичную треугольной нагрузке, то устойчивость склона увеличится.

Рассмотрим влияние вертикальной распределенной нагрузки, приложенной на локальные равные участки поверхности склона. Поверхность склона длиной 160 м (Рис. 3) разобьем на 10 участков длиной по 16 м и к каждому участку последовательно будем прикладывать нагрузку интенсивностью $q=0,25; 0,33; 0,40$ МПа.

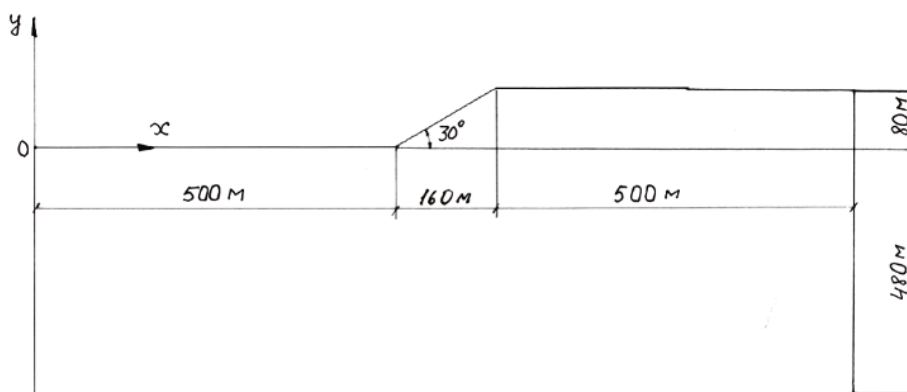


Рис. 3. Размеры расчетной модели.

На Рис. 4-6 в качестве примеров приведены расчетные схемы и НВПР для склона, сложенного глинами (суглинками, супесями) и нагруженными на участках 1, 5, 10 (нумерация участков выполнена снизу вверх). Результаты определения коэффициента устойчивости рассматриваемого склона для всех 60 вариантов сведены в табл. 1.

Если учесть, что коэффициент устойчивости ненагруженного склона для глин и суглинков равен 1,059, а для супесей – 1,792 (см. табл.1), то из анализа следует следующее. С перемещением нагрузки снизу вверх коэффициент устойчивости склона уменьшается для глин (суглинков) на 7,9-9,9%, для супесей на 7,6-11,8%. Склон наиболее устойчив при нижнем и наименее устойчив при верхнем положении нагрузки, коэффициент устойчивости в первом случае больше для глин (суглинков) на 3,8-6,0%, а для супесей на 4,9-8,1%, во втором случае меньше аналогичного коэффициента K ненагруженного склона для глин (суглинков) на 4,4-5,0%, а для супесей 3,1-4,6%. Устойчивость ненагруженного и нагруженного склонов почти одинакова, если нагрузка приложена примерно в середине склона.

Изучалось изменение устойчивости глинистых склонов при нагружении их поверхности равномерно распределенной нагрузкой на нескольких участках. Склон был разделен на 10 равных участков, нижний участок – участок 1, верхний участок – участок 10. На Рис. 7 приведена расчетная

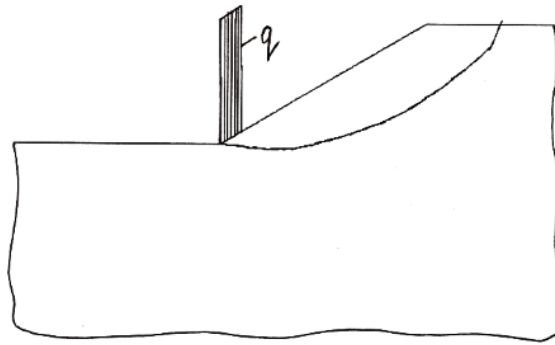


Рис. 4. Расчетная схема при воздействии нагрузки, приложенной на участке №1.

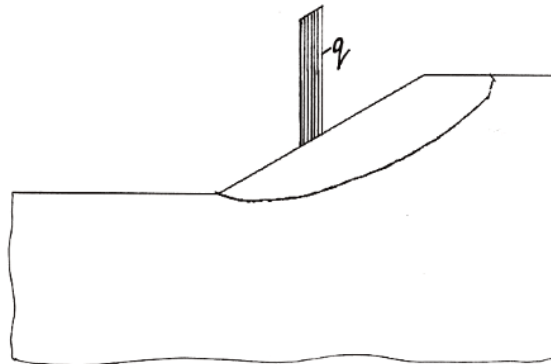


Рис. 5. Расчетная схема при воздействии нагрузки, приложенной на участке №5.

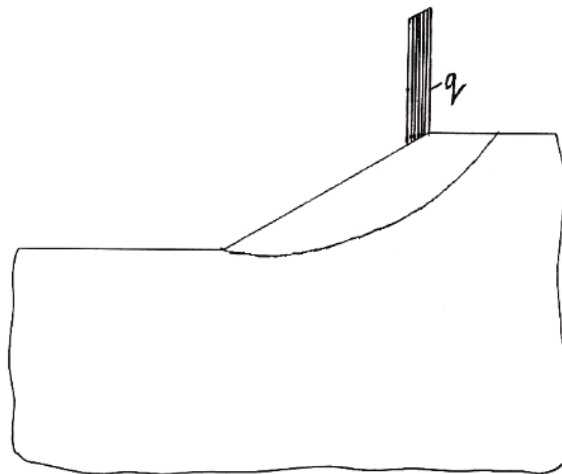


Рис. 6. Расчетная схема при воздействии нагрузки, приложенной на участке №10.

схема НВПР, когда нагрузка приложена одновременно на участках 1, 6 и 10. При $q=0,33$ МПа коэффициент устойчивости для глины (суглинка) равен 1,066, а для супеси 1,79, т.е. по сравнению с ненагруженным склоном коэффициенты устойчивости практически не изменились.

Расчеты, выполненные для схемы по Рис. 3 показали, что при $q=0,25-0,40$ МПа коэффициенты устойчивости нагруженного склона по сравнению с ненагруженным склоном практически совпадают (разница не доходит даже до 1%). Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что прерывистая равномерная нагрузка склона практически не изменяет коэффициенты устойчивости глинистых склонов. При прерывистой равномерной нагрузке склона, каждый нагруженный участок работает по самостоятельной схеме. Нагрузка нижнего 1-го участка и вызванный ею потенциал повышения коэффициента устойчивости склона компенсирует отрица-

Таблица 1.

Зависимость коэффициента устойчивости склона, сложенного глинистыми грунтами, от положения и величины локальной равномерно распределенной нагрузки

№ участка	<i>K</i>					
	Глины, суглинки			Супеси		
	<i>q</i> (МПа)			<i>q</i> (МПа)		
	0,25	0,33	0,40	0,25	0,33	0,40
1	1,099	1,114	1,123	1,880	1,883	1,937
2	1,080	1,090	1,100	1,849	1,850	1,855
3	1,074	1,080	1,083	1,816	1,844	1,850
4	1,084	1,078	1,077	1,819	1,806	1,803
5	1,069	1,066	1,080	1,809	1,825	1,804
6	1,047	1,040	1,052	1,795	1,802	1,804
7	1,049	1,042	1,046	1,792	1,808	1,806
8	1,042	1,040	1,014	1,789	1,786	1,777
9	1,039	1,028	1,031	1,783	1,739	1,751
10	1,012	1,006	1,012	1,737	1,712	1,709

тельный потенциал уменьшения коэффициента устойчивости склона, вызванного нагрузкой верхнего 10-го участка. Нагрузка центрального участка 6 носит по отношению к устойчивости склона нейтральный характер.

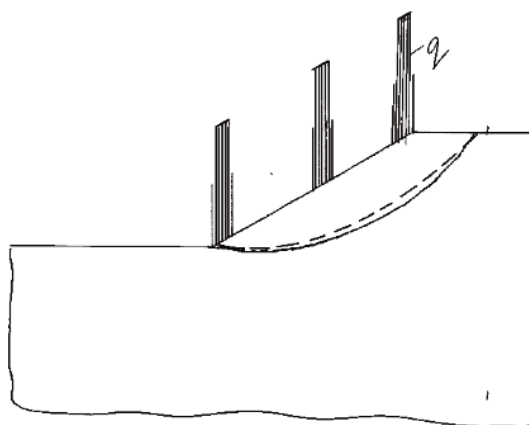


Рис. 7. Расчетная схема, а также НВПР глинистого склона, нагруженного равномерно распределенной нагрузкой трех участках (1, 6 и 10): сплошная линия – глины (суглинки); пунктирная линия – супеси.

На Рис. 8 представлена схема и НВПР, когда нагрузка приложена к участку 1 ($q=0,4$ МПа) и к участку 6 ($q=0,2$ МПа). Расчеты показали, что коэффициент устойчивости для глин (суглинков) $K=1,125$, а для супесей $K=1,909$, т.е. при последней расчетной схеме коэффициент устойчивости склона в среднем на 6,3% больше чем у коэффициентов устойчивости ненагруженного склона и склона нагруженного по схеме указанной на Рис. 7.

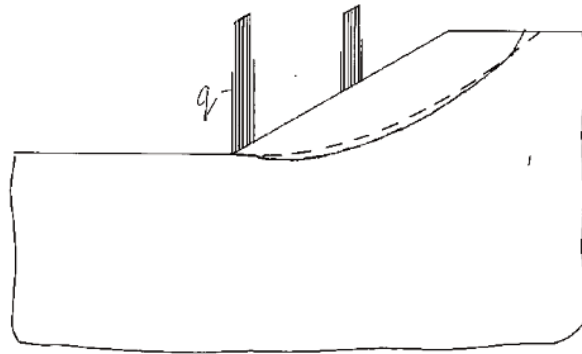


Рис. 8. Расчетная схема, а также вквп глинистого склона нагруженного равномерно распределенной нагрузкой на нижнем (участок 1) участке $\gamma=0,4$ МПа и на среднем (участок 6) участке $\gamma=0,2$ МПа, сплошная линия – глины (суглинки); пунктирная линия – супеси.

Данные исследования подтвердили целесообразность нагружения глинистых склонов треугольной вертикальной нагрузкой, исследованной в работе [3].

Литература

1. Богомолов А.Н. Расчет несущей способности оснований сооружений и устойчивости грунтовых массивов в упругопластической постановке. Пермь, ПГТУ, 1996, 150 с.
2. Габиров Ф.Г., Зейналов А.З., Амрахов А.Т., В.М., Богомолов А.Н. Закономерности изменения устойчивости глинистых склонов при их нагружении равномерно-распределенными нагрузками различной направленности. Материалы научно-практической конференции «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении», Новочеркасск, Издательство «Лик», 2018, с.718-725.
3. Габиров Ф.Г., Амрахов А.Т., Зейналов А.З. Изменение устойчивости глинистых склонов при неравномерном нагружении их поверхности вертикальной нагрузкой, увеличивающейся от бровки к подножью. «Архитектура и строительство в Азербайджане», №2, Баку, 2018, с.34-41.
4. Проектирование нежестких дорожных одежд. Государственная служба дорожного хозяйства, Министерство транспорта РФ, М., 2001.
5. Цветков В.К. Расчет рациональных параметров выработок. М., Недра, 1993, 251 с.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПОСТОЯННЫХ ТОКОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ ОТ КОРРОЗИИ

Т.Д. Евенкова¹, С.Б. Бурлуцкий¹, М.А. Лаздовская¹, А.Ю. Татарский²,
Ж.С. Карам¹, С.Н. Хомутильников¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, г.Санкт-Петербург, Университетская наб., д.7-9-11.
E-mail: st074032@student.spbu.ru, s.burlutsky@spbu.ru, m.lazdovskaya@spbu.ru, st077425@student.spbu.ru,
sergey_khomutinnikov@mail.ru.

²ООО «Спецгеосервис», 199106, г.Санкт-Петербург, ул.Шкиперский проток, д.14/10,
E-mail: antoniotat@gmail.com.

Введение

В настоящее время в нашей стране и в мире строится и эксплуатируется большое количество подземных металлических сооружений, в том числе газопроводов, нефтепродуктопроводов, водопроводов, кабелей, компрессорных и насосных станций и др. Эксплуатация этих производственных объектов несет достаточно большие риски по причине коррозионных отказов. Поэтому, согласно действующей нормативно-технической документации, данные подземные металлические сооружения подлежат комплексной защите от коррозии. Для подавления процесса электрохимической коррозии подземных металлических сооружений применяют изоляционные покрытия (пассивная защита) и катодную поляризацию подземных коммуникаций (активная защита), создаваемую средствами электрохимической защиты от коррозии. Длительная эксплуатация подземных сооружений приводит к старению и разрушению защитных покрытий. Вследствие этого, подавление электрохимической коррозии требует увеличения величины защитного тока катодной защиты. На трубопроводах, эксплуатируемых более 50 лет выходная сила тока на станциях катодной защиты может достигать до сотни ампер, а плотность защитного тока достигать десятков А/м². Ранее выполненные исследования показали, что в результате катодной поляризации подземных металлических сооружений, расположенных в глинистых грунтах, происходит значительное увеличение рН грунтового электролита и уменьшение удельного электрического сопротивления грунтов, что в значительной степени повышает их коррозионную агрессивность [2,3]. Кроме того, катодная поляризация способствует изменению физико-механических свойств дисперсных грунтов, слагающих пространство около катодно-защищаемых сооружений.

Целью настоящих исследований является оценка влияния катодной поляризации на изменение свойств глинистых грунтов, слагающих пространство вблизи подземных катодно-защищаемых инженерных сооружений.

Теоретические предпосылки исследования

Согласно существующим представлениям, наложение поля постоянного тока катодной защиты в дисперсных грунтах способствует протеканию двух основных электрокинетических процессов: это электроосмотическое движение воды и электрофорез. В результате первого процесса вода, увлекаемая катионами диффузной части ДЭС, передвигается от анода в сторону катодно-защищаемого сооружения. Второй процесс заключается в перемещении тонкодисперсных глинистых частиц от инженерного сооружения к анодному заземлению. В результате протекания этих двух процессов, грунты, слагающие пространство возле анодного заземления, будут характеризоваться пониженной влажностью и пористостью, их строительные свойства будут значительно улучшены. Этот эффективный прием применяется при электрохимическом закреплении слабых дисперсных грунтов [1]. Напротив, грунты, расположенные в районе катода, будут характеризоваться повышенной влажностью и пористостью. За счет протекания электрохимических процессов, рН грунтового электролита будет увеличиваться, а удельное электрическое сопротивление уменьшаться.

С целью оценки изменения физико-химических и физико-механических свойств дисперсных грунтов под влиянием токов катодной защиты, было выполнено физическое моделирование на образце глинистого грунта.

Описание методики и установки физического моделирования и электрометрического мониторинга

Образец монолита глинистого грунта для физического моделирования был отобран в районе пос.Никольское Ленинградской области, Рис. 1.



Рис. 1. Отбор монолита грунта для исследования.

Исследования выполнялись на образце формы близкой к параллелепипеду размером 400х250х250 мм. Для сохранения естественной влажности образец в процессе эксперимента был обернут несколькими слоями технической стретч-пленки. Контрольный образец, идентичный испытуемому сохранялся в аналогичных условиях для последующего сопоставления физико-химических и физико-механических свойств. Поляризация испытываемого образца осуществлялась с помощью регулируемого источника постоянного тока. В качестве электродов для контакта с грунтом использовались две стальные пластины одинакового размера 210х297 мм. Электроды располагались на противоположных боковых торцах образца. Для внешней электрической цепи, электрод, на который подается минус от источника постоянного тока, обозначался как «катод», электрод на который подается плюс – «анод». Поляризация образца постоянным током величиной 140 мА проводилась непрерывно в течение 44 сут. Общий вид установки приводится на Рис. 2.



Рис. 2. Установка для поляризации образца постоянным током.

Для контроля изменений электрических свойств образца в процессе эксперимента с периодичностью 1 раз в 10 сут. выполнялись мониторинговые электрометрические измерения. Профиль наблюдения длиной 32 см располагался на верхней горизонтальной поверхности образца, пикет 0 профиля находился в 2 см от катодного электрода, пикет 32 в 2 см от анодного электрода. Электрометрические измерения выполнялись вдоль профиля шагом 2 см с помощью четырехэлектродной установки AMNB, располагающейся ортогонально профилю. В каждой точке измерения выполнялись замеры с тремя разносами питающей линии АВ. Параметры установок: MN=2см, АВ/2=5;8;11 см. Измерения проводились с помощью электроразведочной аппаратуры «ЭРА-МАХ» стабилизированным низкочастотным переменным током на частоте 4.88 Гц. Контакт стальных электродов с образцом осуществлялся через отверстия в защитной пленке. После измерений защитное покрытие восстанавливалось. Источник постоянного тока во время электрометрических исследований отключался. Схема расположения профиля и электроразведочной установки на профиле приводится на Рис. 3.



Рис. 3. Схема расположения профиля и электроразведочной установки.

Анализ результатов электрометрического мониторинга

Всего было выполнено 5 циклов измерений, по результатам каждого цикла измерений был получен разрез кажущихся сопротивлений (КС). Разрез КС для цикла I приводится на Рис. 4.

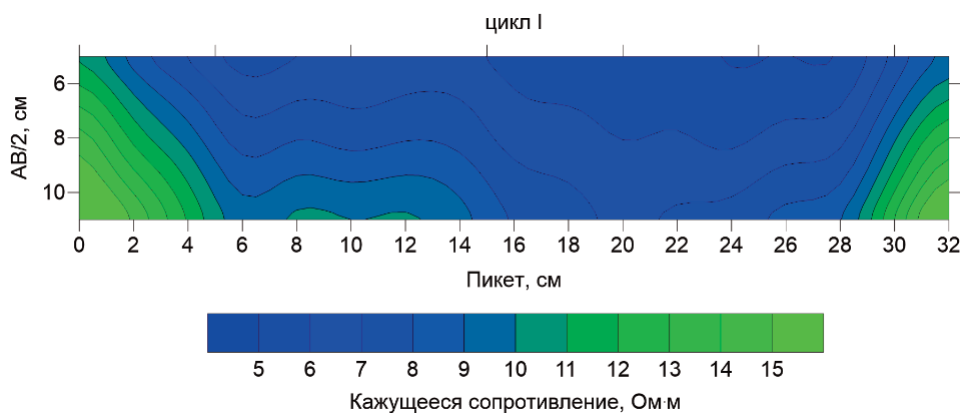


Рис. 4. Разрез кажущегося сопротивления I цикла измерений (0 суток).

Для выделения процессов, развивающихся во времени, были рассчитаны относительные изменения КС (D) для всех циклов относительно опорного цикла I. Изменения сопротивления D (%) были рассчитаны по формуле:

$$D = (KC_i - KC_1) / KC_1 \times 100\%,$$

где KC_1 – значения кажущегося сопротивления в I цикле; KC_i – значения в последующих циклах (II, III, IV, V). На Рис. 5 представлены разностные разрезы D для всех циклов относительно опорного цикла I.

Расчет разностных разрезов позволил устранить постоянную составляющую разреза, связанную с геометрией образца при расположении электроразведочной установки в начале и в конце профиля вблизи анода и катода и на максимальных разносах питающих электродов вблизи боковых граней образца. Оставшиеся аномалии на разрезах интерпретировались, как изменения электрического сопротивления разреза во времени в процессе эксперимента.

В средней части профиля отмечается постепенное общее уменьшение КС от I цикла к V циклу, достигающее 20%. Основные изменения касаются локальных областей в области катода и анода. С I цикла до IV цикла наблюдается снижение КС, достигающее 50% на пикетах 0-4 профиля, т.е. на участке, непосредственно примыкающем к катоду. При этом на участке профиля, примыкающем к аноду, наблюдается повышение КС, составляющее выше 60%.

Качественное изменение разреза происходит на V цикле измерений, когда при продолжающемся снижении значений кажущегося сопротивления в области катода происходит резкое снижение КС и в области анода. Визуально это сопровождалось коррозионным разрушением анодного электрода на контакте с образцом, что стало причиной завершения поляризации образца.

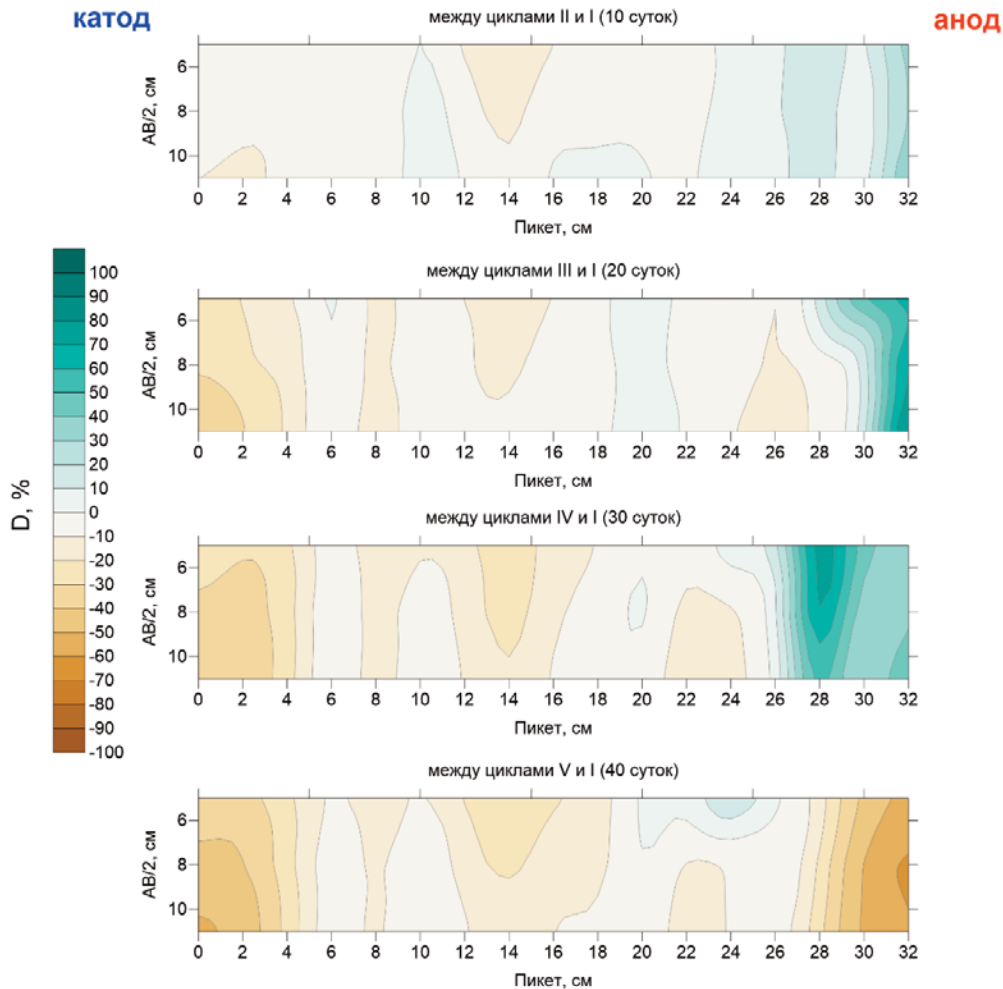


Рис. 5. Изменение кажущегося сопротивления D в ходе поляризации образца.

Таким образом, физическое моделирование показало, что в результате катодной поляризации наблюдается значительное уменьшение значений удельного электрического сопротивления глинистых грунтов, что увеличивает их коррозионную агрессивность.

Анализ изменения физико-механических и физико-химических свойств грунта

Для определения физико-механических и физико-химических свойств были отобраны образцы нарушенного и ненарушенного сложения из исходного грунта и измененного в процессе проведения эксперимента (в пределах катодной зоны). Были определены следующие характеристики: гранулометрический состав, плотность (ρ , г/см³), влажность (W , %), плотность твердых частиц грунта (ρ_s , г/см³), плотность сухого грунта (ρ_d , г/см³), пористость (n , %), коэффициент пористости (e), показатели пластичности и консистенции, а также водородный показатель (рН). Результаты исследований представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1.										
Гранулометрический состав грунта										
Размер частиц, мм										
Галька, щебень	Гравий, дресва		Песок					Пыль		Глина
	>10	10-5	5-2	2-1	1-05	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	
Исходный грунт										
-	-	-	-	0,57	0,57	0,73	2,94	25,11	26,67	43,41
После окончания эксперимента (катодная зона)										
-	-	-	-	2,87	3,03	4,37	4,12	28,71	27,67	29,23

Таблица 2.		
Физико-механические свойства грунта		
Характеристики	Исходный грунт	После эксперимента (катодная зона)
Плотность грунта (ρ , г/см ³)	2,10	1,91
Влажность (W , %)	22	27
Плотность тв. частиц грунта (ρ_s , г/см ³)	2,76	2,77
Плотность сухого грунта (ρ_d , г/см ³)	1,72	1,50
Пористость (n , %)	37,7	45,8
Коэффициент пористости (e)	0,605	0,847
Водородный показатель (рН)	8	10
Нижний предел пластичности (W_p , %)	26	32
Верхний предел пластичности (W_L , %)	47	61
Число пластичности (I_p)	21	29
Показатель консистенции (I_L)	-0,19	-0,24
Угол внутреннего трения (φ , °)	8	15
Сцепление (C , кПа)	52,57	65,53

Анализ результатов показывает, что свойства грунта в катодной зоне претерпели определенную трансформацию. Например, довольно сильные изменения произошли в гранулометрическом составе: уменьшилось содержание глинистой фракции на 14,18% (примерно, в 1,5 раза по сравнению

с исходным образцом), в то время как содержание песчаной фракции увеличилось на 9,58%, а пылеватой, примерно, на 5%. Это может быть следствием процесса электрофореза, когда глинистые частицы под действием электрического тока мигрируют в сторону анода. Следует отметить довольно значительные изменения показателя плотности грунта – уменьшение плотности грунта с 2,10 до 1,91 г/см³, и увеличение пористости с 37,7 до 44,8%. Увеличение водородного показателя рН с 8 до 10 (от слабощелочной к щелочной среде) обусловлено концентрацией гидроксильных групп в катодной зоне. Необходимо отметить, что значения показателей пластичности также заметно изменились. Так, влажность нижнего и верхнего пределов пластичности грунта, отобранного из катодной зоны, возросли на 6 и 14% соответственно, а число пластичности – на 8%.

Анализ результатов изменения прочностных свойств грунта (значений угла внутреннего трения φ и удельного сцепления C) показал увеличение значений φ после поляризации в катодной зоне с 8° до 15°. Скорее всего такое значительное увеличение значений угла внутреннего трения связано с увеличением количества песчаной фракции в катодной зоне.

Таким образом, в результате катодной поляризации свойства грунта претерпели значительные изменения. Отдельно следует отметить увеличение щелочности среды, что наряду с увеличением удельного электрического сопротивления сказывается на коррозионной агрессивности грунта.

Выводы

Выполненное физическое моделирование позволило воспроизвести в лабораторных условиях процесс изменения физико-химических и физико-механических свойств образца глинистого грунта под действием электрической поляризации постоянным током.

Эксперимент сопровождался низкочастотным электрометрическим мониторингом, который позволил зафиксировать уменьшение электрического сопротивления грунта в области катода и увеличение в области анода.

Долговременное воздействие на грунты постоянного тока, например в процессе работы систем защиты от коррозии, способствует формированию инженерно-геологического элемента техногенно-измененных грунтов, который обладает повышенной коррозионной агрессивностью, и значительно отличается по физико-механическим и физико-химическим свойствам от исходных грунтов. Формирование подобных техногенно-измененных грунтов и их свойства необходимо учитывать как при расчете систем защиты от коррозии, так и при оценке инженерно-геологических условий территории.

Литература

1. Злочевская Р.И., Королев В.А. *Электроповерхностные явления в глинистых грунтах*. Издательство МГУ, 1988.
2. Яблчанский П.А. *Обоснование мероприятий по защите подземных нефтегазопроводов от коррозионного воздействия высоковольтных линий электропередачи переменного тока*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербург, 2014.
3. Lars Nielsen. *DGC.FAUGT.10 AC/DC interference corrosion in pipelines. Summary Report, MetriCorr, 25.04.2006. – 46 p.*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БПЛА ПРИ АЭРОФОТОСЪЕМКЕ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЯНАО С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ

С.Н. Елохина, Е.С. Зырянова, А.А. Худяков

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», 620144, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30. E-mail: elohina.s@mail.ru

ФГБУ «ГИДРОСПЕЦГЕОЛОГИЯ» филиал «УРЦ ГМСН», 620014, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Вайнера, 55. E-mail: uralrc@specgeo.ru

Введение

Арктическая зона Российской Федерации – уникальный геологический и криологический регион. Одной из важных особенностей геологического строения арктических территорий является наличие толщ многолетнемерзлых пород (ММП). Из-за активно протекающих процессов изменения климата, становятся актуальными вопросы устойчивости вечной мерзлоты, которая определяет экологическую стабильность и инженерно-геологическую устойчивость инфраструктурных сооружений в осваиваемых регионах. Существенно затрудняют освоение территорий и несут угрозы жизнедеятельности человека наличие термокарста и криогенного пучения. Выявление и мониторинг развития опасных геологических и природно-техногенных явлений является одной из важнейших задач государственного мониторинга состояния недр (ГМСН) в Российской Федерации.

В научной литературе обозначена важность наблюдений за такими проявлениями криогенного комплекса процессов, как пучение, в основном через их проявления, так называемые, бугры пучения.

В статье В.И. Богоявленского описан факт разрушения бугра пучения в русле заполярной реки в июне 2017 г. взрывом газа с формированием гигантского кратера [1]. Выбросы газа могут существенно осложнять строительство и эксплуатацию объектов инфраструктуры и сопровождаться аварийными ситуациями.

По данным Ю.К. Васильчука за последние 100-200 лет большое количество бугров пучения протаяло и деградировало, особенно вблизи южной границы распространения ММП. Вместе с тем имеются данные о современном росте бугров и увеличении площади их распространения, что требует углубленного анализа [2].

Одним из современных инструментов мониторинга, в том числе для обследования бугров пучения, является использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), позволяющее получить необходимую полноту данных об объекте, включая плановые размеры, площадь, объем, уклон и др. К задачам использования БПЛА относится: получение плотного облака точек участка, тайловой модели, трехмерной модели, карты высот и ортофотоплана.

В работе рассматриваются результаты обработки аэрофотосъемки бугра пучения (гидролакколита) в средней части полуострова Ямал с.Сеяха на основе снимков БПЛА DJI Phantom 4 Pro+.

Терминология и характеристика формирования лакколитов

Криогенное пучение – это сложный комплекс процессов, вызванный прежде всего промерзанием грунта, включающий криогенную и напорную миграцию воды (или разжиженной грунтовой массы), ее замерзание и образование льда (разуплотняющей грунтовой скелет), которая приводит к увеличению объема, поднятию и деформации поверхности грунта. Различают три основных механизма образования бугров: инъекционный, сегрегационный и инъекционно-сегрегационный. По типу и характеру развития пучение подразделяется на сезонное и многолетнее.

Длительное, растягивающееся обычно на много лет промерзание и достаточное увлажненных таликовых участков приводит к общему поднятию их поверхности на 1-3 м. При сосредоточении грунтовых вод на сравнительно небольшой площади, локализации выхода подземных вод и преимущественным образованием в ограниченной области промерзающего грунта, обильных выделений льда, прослоев толщиной 2-20 см, а также линз и штоков мощностью 5-10 м и более возникают многолетние бугры пучения. Рост многолетних бугров длится обычно от нескольких до десятков лет со скоростью подъема от нескольких сантиметров до 0,5 м (по редким наблюдениям) в год [3].

Ледяные тела типа лакколитов, сформировавшиеся при инъекциях воды в ослабленные зоны массивов горных пород, также развиты широко. В процессе внедрения воды происходит смятие вмещающих, преимущественно суглинистых пород, часто довольно интенсивное. Зона смятия пород имеет мощность в несколько метров, она сильнольдонасыщена и имеет сетчатую криогенную текстуру с преобладанием вертикальных и косых шпиров льда, начинающихся непосредственно от ледяного тела. Очень часто в толще лакколитов выделяются, слои льда различного цвета и текстуры, содержащие различное количество примесей песчаного или суглинистого материала. Формирование лакколитов связано с многократными, повторными инъекциями воды из нижележащих промерзающих водоносных горизонтов. Линзы инъекционного льда, имеющие позднеголоценовый и более древний возраст, выражены в рельефе многолетними буграми пучения и гидролакколитами [5].

Современные гидролакколиты находятся районах с достаточно низкой среднегодовой температурой пород: $-(3,4)^{\circ}\text{C}$ и ниже. Древние гидролакколиты, период формирования которых приходится на более холодные эпохи, в прошлом были распространены на участках с прерывистой мерзлотой [3].

Методика изучения бугров пучения

Наблюдения за опасными ЭГП (в рамках ГМСН) на территории УрФО выполняются на регулярной основе специалистами ФГБУ «ГИДРОСПЕЦГЕОЛОГИЯ» на стационарных пунктах государственной опорной наблюдательной сети.

Наблюдения включают: маршрутное обследование территории и расположенных на ней инженерных объектов, их привязку с помощью GPS-навигатора; фотодокументацию проявлений; описание формы проявлений в плане и разрезе; снятие линейных размеров проявлений лазерным дальномером и рулеткой по временным маркам; привязку реперов и марок с помощью геодезического оборудования; съемку проявлений опасных ЭГП с помощью БПЛА (DJI Phantom 4 Pro, DJI Mavic Mini и других с усиленной топоориентацией). На объектах измеряется глубина, длина, ширина проявлений, фиксируются появившиеся признаки активизации процессов.

При изучении проявлений должно уделяться внимание определению типа процесса пучения, генезиса, особенностей распространения, морфологии, размеров, а также стадии развития процесса. На ключевых участках осуществляется детальное изучение процесса, для этого в пределах каждого типа образований бурятся скважины, проводятся термометрические и ландшафтные наблюдения. Определяется состав пород, криогенная текстура, наличие мощных ледяных прослоев, объемная льдистость [4].

Определяются геокриологические условия, в которых развиваются пучинистые образования: среднегодовая температура грунтов, наличие (или отсутствие) многолетнемерзлых пород на окружающей территории, мощность мерзлотной линзы (на участках новообразования), глубина и тип сезонного протаивания (промерзания), характер межбугровых понижений [4].

Определяются гидрогеологические условия и тип вод по отношению к мерзлой толще, приуроченность к определенному горизонту или комплексу, химический состав и режим [4].

Для определения линейных размеров проявлений используется аэрофотосъемка с помощью БПЛА. Аэрофотосъемка выполняется в несколько этапов: намечается и анализируется область полета БПЛА; производится маркировка либо привязка опорных точек на местности (например, осуществляется установка марок, опознавательных знаков и т.д.); выполняется полетное задание; производится камеральная обработка полученных материалов.

По результатам аэрофотосъемки устанавливается: форма, линейные размеры, площади пучения; характер растительного (напочвенного и древесного) покрова как на буграх, так и на окружающей их территории, а также его особенности, указывающие на стадию процесса. Устанавливается наличие трещин и других геологических процессов (пятен-медальонов, песчаных раздувов, термокарстовых образований и т.д.). На инженерно-геокриологической карте определяется пораженность территории процессом [4].

Обработка, склейка и выравнивание фотографий осуществляется в программе Agisoft Metashape (ООО «Агисофт», Россия); производится построение плотного облака точек, 3D модели, тайловой модели, карты высот и изолиний, ортофотоплана. На основании 3D модели и карты высот производится построение границ проявления. Расчеты и окончательное оформление выполняется в программах AutoCAD Civil 3D (Autodesk, Inc., США) и ArcGIS (Esri, США).

В программе AutoCAD Civil 3D вычисляются линейные размеры проявления (ширина, длина и высота). По выделенному контуру проявления, рассчитывается площадь объекта. На основе полу-

ченных горизонталей рельефа и секущей плоскости (в данном случае контур проявления), рассчитывается объем поверхности бугра пучения. По заданной линии в требуемом масштабе вычерчивается профиль рельефа местности.

В программе Esri ArcGis производится пространственная привязка ортофотоплана, построенного в программе Agisoft Metashape, и полигонов (линий), построенных в AutoCAD Civil 3D. Формируется готовое изображение, на котором наглядно отображается проявление, его контуры, линейные размеры, трещины, линии построения разреза и т.д.

Методы прогноза

К числу основных природных факторов, характеризующих интенсивность проявления криогенного пучения, относится следующее:

1. Минеральный и гранулометрический состав и водно-физические свойства грунтов.
2. Влажность грунтов перед промерзанием и характер увлажнения в процессе промерзания.
3. Интенсивность охлаждения, скорость и глубина промерзания.

Знания этих факторов достаточно для установления возможности и интенсивности проявления пучения. Что же касается количественной оценки возможности развития многолетних бугров пучения, то таких методов пока не существует. Прогноз формирования бугров пучения в настоящее время возможен лишь аналоговым методом на основе литературных данных и их обобщения, а также по материалам аэрофотосъемки [3]. Количественная оценка этого явления чрезвычайно трудна, особенно в региональном плане [5].

При оценке процесса необходимо определить следующие параметры: суммарную величину пучения, среднюю интенсивность пучения по глубине, неравномерность пучения по площади [3]

Пораженность территории хорошо определяется по данным дешифрирования аэрофото- и космоснимков высокого разрешения, фотопланам, полученным со съемок БПЛА. Наиболее перспективными является анализ радиолокационных изображений методами дифференциации интерферометрии и текстурного анализа спутниковых изображений [7].

Результаты обследования участка «Сеяха» и обработки полевых данных

В качестве примера рассмотрим использование БПЛА при обследовании многолетнего бугра пучения на плановом участке обследования ГМСН в ЯНАО. Первичное плановое обследование выполнено в июле 2021 г. специалистами Уральского регионального центра ГМСН (филиал ФГБУ «ГИДРОСПЕЦГЕОЛОГИЯ»), с целью заверки результатов дешифрирования, описания опасных экзогенных геологических процессов в районе с. Сеяха и оценки их воздействия на инженерно-хозяйственные объекты.

В административном плане участок обследования «Сеяха» расположен в Ямальском районе ЯНАО на территории с. Сеяха.

В геологическом плане участок обследования принадлежит инженерно-геологическому региону Западно-Сибирской плиты, в области сплошного распространения ММП, в подобласти преимущественно песчаных грунтов. По схеме общего геокриологического районирования, участок «Сеяхинский» относится к Западно-Сибирскому региону I порядка, континентальному региону II порядка, зоне северной, подзоне Лескино-Антипаютинская, область Восточноямальская [6].

По Геокриологической карте СССР масштаба 1:2500000 R-43 (Обская губа): среднегодовая температура пород на подошве слоя годовых колебаний от -5 до -7°C; тип сезонного оттаивания устойчивый от -5 до -10°C; мощность мерзлых пород 200-300 м. Распространение и мощность пород с криопэгами – преимущественно несплошное (мощность 0-50 м); время начала существования пород в мерзлом состоянии – плейстоцен.

На участке развиты пойменные и заболоченные почвы мощностью до 1,6 м.

Согласно геологической карте дочетвертичных образований Российской Федерации масштаба 1:1000000 листа R-43 (Обская губа), на участке развиты аллювий пойменных террас и русла р.Сеяха, представленные песками и глинами, мощностью до 8 м (αН).

Всего обследовано 26 точек наблюдений: на участке выделены пятна-медальоны, бугры пучения, песчаные раздувы, термоэрозия, термоабразия и другие сопутствующие комплекса гравитационных процессов по высоким берегам озер, р.Сеяха и Обской Губы.

Выделен участок развития полигональных форм рельефа, который расположен на правом берегу, в пойме р.Сеяха. Размеры в плане от 11×14 до 13×18 м (Рис. 1).

Участки развития бугров пучения, расположены на правом коренном борту долины р.Сеяха. Общие размеры участка в плане по данным аэрофотоснимков 0,2-0,4 км. Размеры бугров пучения: максимальный диаметр до 15 м, высота до 4 м (Рис. 2). Склоны и вершины бугров разбиты многочисленными трещинами, шириной до 0,3-0,4 м, глубиной до 1 м.

Отмечается разрушение участков высоких берегов р.Сеяха и Обской губы, вследствие интенсивного таяния льдов. Вдоль береговой кромки активно развивается термоабразия с сопутствующим комплексом гравитационных процессов и оказывающие воздействие на инженерно-хозяйственные объекты (Рис. 3). На территории населенного пункта активно развивается термоэрозионный процесс – сеть термоэрозионных оврагов, потенциально угрожающая капитальным объектам, включая жилые здания в с.Сеяха.



Рис. 1. Пятна-медальоны вблизи изучаемого бугра пучения.



Рис. 2. Бугры пучения на правом коренном борту долины р.Сеяха.



Рис. 3. Слева – термоабразионный берег, вблизи расположены металлические марки. Справа – активный термоабразионный процесс в районе причала с.Сеяха.

Исследуемый бугор пучения развивался в условиях высокого влагонасыщения. Предположительно, механизм образования многолетнего бугра пучения – инъекционно-сегрегационный (по данным характеристики географического распространения многолетних бугристых образований, С.Е. Гречищев, 1981 [3]).

В настоящее время бугор пучения, предположительно, находится на стадии стабилизации. В свою очередь, разрушение бугра пучения в основном связано с протаиванием верхней льдистой толщи и осадкой грунтов.

В плане, бугор пучения удлиненной (овальной) формы, простирающейся с северо-запада на юго-восток. Поверхность бугра заросла мохово-кустарничковой растительностью (Рис. 4).

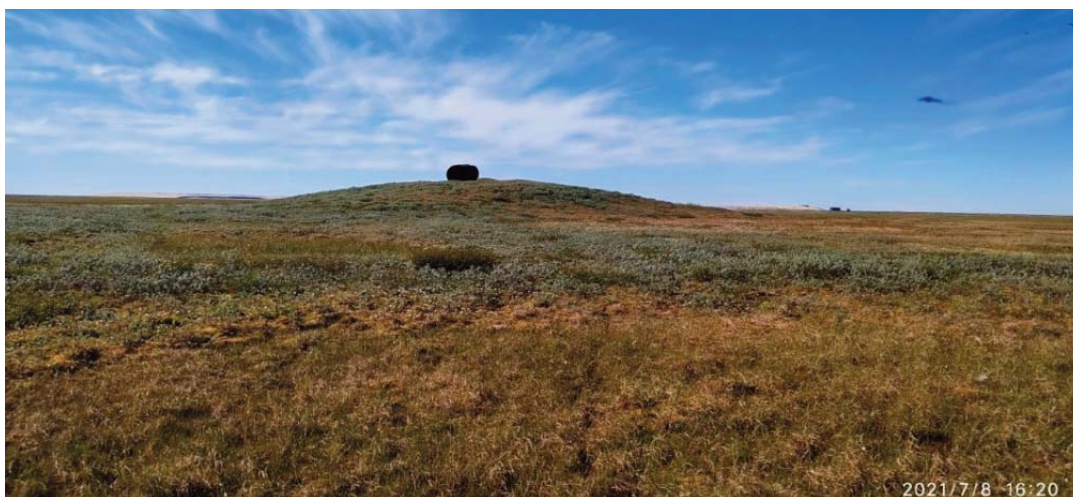


Рис. 4. Общий вид на многолетний бугор пучения. Расположен в 2,5 км на запад от с.Сеяха. На вершине бугра металлическая бочка высотой до 2 м.

По обработанным данным аэрофотосъемки, получены линейные размеры проявления: длина 74,4, ширина 62,9, высота 5,0 м (Рис. 5). Уклон поверхности от центра бугра пучения до края составляет 5-11,5°. Площадь поверхности бугра пучения составляет 3,3 тыс. м², объем поверхности 5,8 тыс. м³.

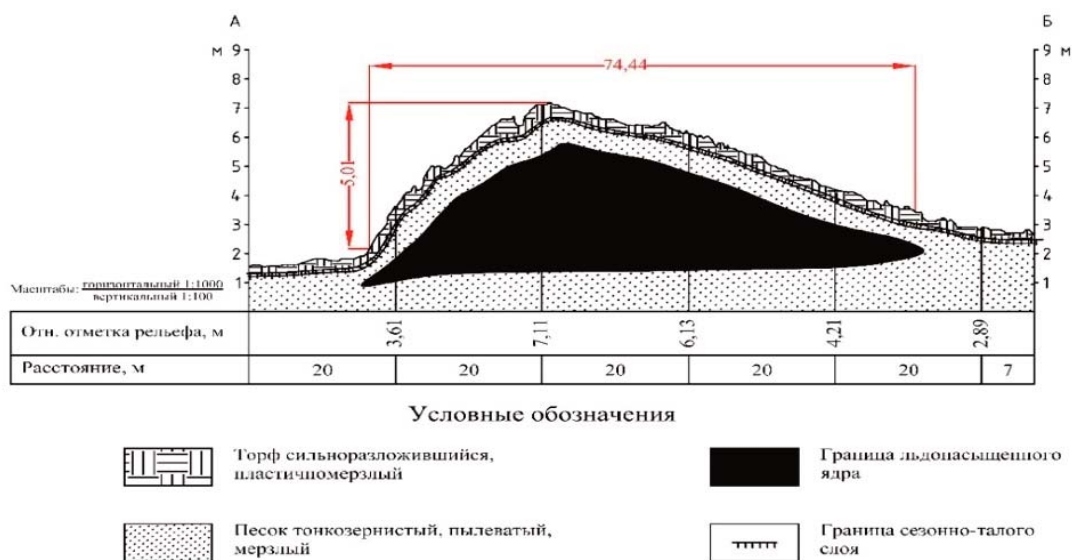
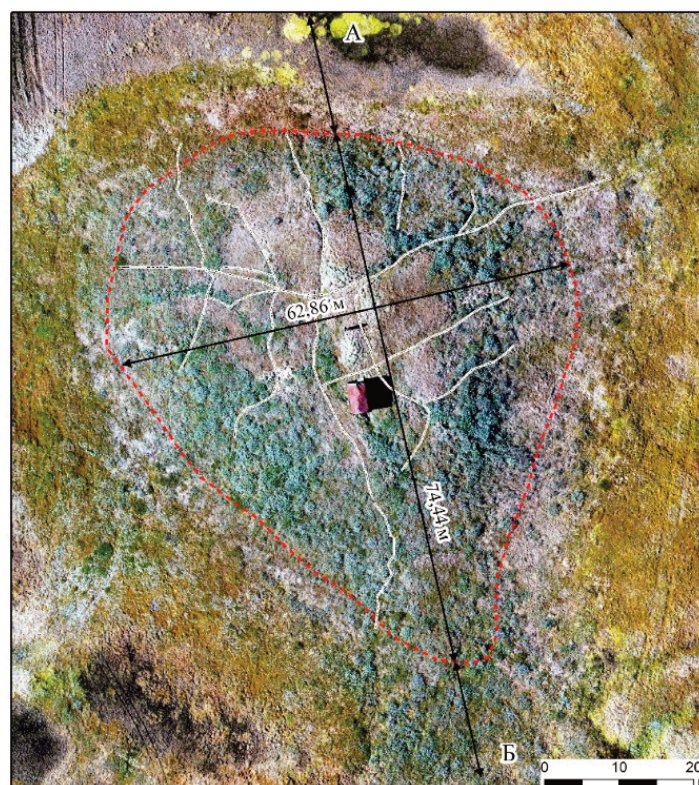


Рис. 5. Схематический геокриологический разрез по линии А-Б. Профиль рельефа, линейные размеры получены по данным аэрофотосъемки и постобработки в программах.

Вершина и склоны гидролакколита покрыты сетью трещин шириной до 1,0 м и глубиной до 0,5 м (Рис. 6). Вдоль сети трещин торф сильно деградирует, предположительно, его мощность составляет до 0,7 м. Глубина сезонно-талого слоя составляет 0,4-0,6 м.



Условные обозначения

- - - Граница гидролакколита
- А ← Б Линия профиля рельефа
- ↔ Линейные размеры проявления
- Сеть трещин

Рис. 6. Ортофотоплан многолетнего бугра пучения.

Заключение

Одной из главных преимуществ при использовании БПЛА в мониторинговых наблюдениях – получение необходимых данных о снимаемом объекте. В отличие от космо- и аэрофотосъемки, использование БПЛА позволяет получить высокодетализированные и высокоточные данные для последующей обработки в программном обеспечении с возможностью получить линейные размеры наблюдаемого объекта. К преимуществам также относится: доступность и низкая стоимость оборудования.

Опыт применения БПЛА при обследовании опасных ЭГП предполагает дальнейшее использование в мониторинговых наблюдениях. Планируется и дальнейшее усовершенствование описанной технологии: современные методы с установкой ГНСС RTK приемника на БПЛА, позволяют увеличить точность получаемых координат в 5 раз, а использование БПЛА с технологией lidar, расширяет применение методики БПЛА для съемки густозаселенной местности.

На участке планируется дальнейшее изучение строения гидролакколита, например, комплексированием с термометрическими наблюдениями сезонно-талого слоя, текстурного анализа спутниковых изображений и др.

Литература

1. Богоявленский В.И., Сизов О.С., Мажаров А.В. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. - 2019. - № 1 (33). - С. 88-105. - DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105.
2. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов / Под редакцией действительного члена РАЕН, профессора Ю.К.Васильчука - М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. – 571 с.

3. Гречищев С.Е. Методические рекомендации по прогнозу развития криогенных физико-геологических процессов в осваиваемых районах Крайнего Севера. М.: ВСЕГИНГЕО, 1981. 78 с.).
4. Мельников Е.С., Горальчук М.И. и др. Методические рекомендации по инженерно-геокриологической съемке (север Западной Сибири). М., ВСЕГИНГЕО, 1977, с. 104
5. Трофимов В.Т. Закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий Западно-Сибирской плиты. М., Изд-во Моск. Ун-та, 1977. 276 с.
6. Трофимов В.Т., Бадю Ю.Б., Васильчук Ю.К., Кашиперюк П.И., Фирсов Н.Г. Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты. – М.: Наука, 1987
7. Чимитдоржиев Т.Н., Быков М.Е., Лейбман М.О., Дагуров П.Н., Кирбижекова И.И., Дворников Ю.А., Бердников Н.М. Исследование микродеформаций и оползневых процессов северных территорий Западной Сибири на основе интерферометрических данных. Сибирский аэрокосмический журнал, № 5 (51), 2013, Красноярск, с. 65-68.)

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ПРОГНОЗА ИХ ИЗМЕНЕНИЯ

Ф.С. Карпенко, В.Н. Кутергин, Е.О. Дернова, А.А. Осокин

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 101000, г.Москва, Уланский пер., д.13, стр.2.
E-mail: kafs08@bk.ru

Мерзлые грунты занимают важное место в хозяйственной деятельности. Они широко распространены на территории России и часто являются грунтами оснований фундаментов сооружений. Все это определяет высокие требования к качеству исследований мерзлых грунтов, результаты которых должны давать не только полную объективную характеристику их свойств, но и прогноз их возможных изменений в результате действий различных факторов. В настоящее время инженерно-геологические исследования мерзлых грунтов не всегда могут дать такую оценку, и в первую очередь это касается изменения свойств мерзлых грунтов в результате температурного воздействия. Происходящие в настоящее время изменения климата наглядно подтверждают это положение. Климатические изменения вызывают закономерное постепенное повышение температуры грунтов геокриолитозоны, приводящее к изменениям ее состояния и строения. В результате этих явлений происходит активизация разнообразных экзогенных геологических процессов, влияющих на безопасность инженерных сооружений в криолитозоне, многие из которых могут иметь негативные, а в ряде случаев и катастрофические последствия, таких как газовые выбросы, воронки взрывов, просадки, деформации фундаментов, береговая, овражная эрозия, склоновые явления, и другие процессы. Характерной современной особенностью этих процессов является то, что их протекание и активизация происходит даже в условиях сохранения мерзлого фазового состояния грунтов, а природа их развития остается до конца не определенной.

Все эти явления требуют ответной реакции, активного вмешательства в их протекание, проведения специальных защитных мероприятий. Такое реагирование на уже произошедшие изменения состояния мерзлых грунтов не могут быть эффективными, и не могут предвосхищать негативные явления, которые будут протекать в мерзлых грунтах при дальнейшем изменении геокриологических условий.

Решить эти проблемы можно на основе изменения подхода к проектированию и строительству новых и адаптации действующих инженерных сооружений к меняющимся свойствам мерзлых грунтов в результате изменения строения геокриолитозоны. Этот подход должен быть основан на изучении реакции мерзлых грунтов на изменения криологических условий, позволяющем дать полный объективный прогноз изменения их свойств при разных сценариях климатических изменений.

Для проведения таких исследований требуется разработка нового специального методического подхода к инженерно-геологическому изучению мерзлых грунтов. Основные необходимые, на взгляд авторов, принципы такого подхода, связанные с проведением грунтоведческих исследований, определением строения и свойств мерзлых грунтов, изложены в настоящей работе. В основе такого подхода должен быть положен анализ действующих нормативных документов, определяющих направления и требования к изучению строения и свойств мерзлых грунтов, и новых научных и методических разработок, касающихся этих вопросов.

Расчет оснований и фундаментов инженерных сооружений, в соответствии с требованиями нормативных документов (СП 446.1325800.2019 [11], СП 22.13330.2016 [9], СП 25.13330.2012 [10]) проводится для всех классов грунтов по двум группам предельных состояний.

Первая группа – это несущая способность грунтов. Несущая способность грунта определяет предельное напряженное состояние, превышение которого приводит к потере устойчивости, вплоть до разрушения, фундаментов и оснований сооружений и их полной непригодности к эксплуатации. Определение несущей способности грунтов проводится расчетным путем на основе результатов определения их свойств, основными из которых являются показатели прочности, угол внутреннего трения и сцепления.

Вторая группа предельных состояний – деформируемость грунтов. Деформируемость грунта определяет предельное напряженное состояние, превышение которого приводит к развитию недо-

пустимых деформаций фундаментов и оснований сооружений, затрудняющих их нормальное функционирование (осадок, подъемов, прогибов, трещин и т. п.). Определение деформируемости грунтов проводится расчетным путем на основе результатов определения их свойств, основным из которых является величина модуля деформации.

Строительство и эксплуатация инженерных объектов и сооружений на территориях развития мерзлых грунтов имеет дополнительную специфику. Многолетнемерзлые грунты традиционно рассматриваются как относительно стабильные образования, сложенные в основном минеральными частицами, дополнительно сцементированными льдом при замерзании. Общепринято считать, что изменение свойств мерзлых грунтов происходит при переходе из мерзлого фазового состояния в талое. В интервалах температур ниже температур замерзания-оттаивания свойства мерзлых грунтов считаются практически неизменными. Такой подход определяет направления исследований свойств мерзлых грунтов при инженерно-геологических изысканиях – испытания проводятся в условиях сохранения естественной температуры и при оттаивании. Эти данные используются для проектных расчетов несущей способности и других свойств грунтов оснований сооружений.

В соответствии с требованиями нормативных документов СП 25.13330.2012 [10] оно должно проводиться на основе применения одного из двух принципов: в условиях сохранения естественной температуры грунтов и их мерзлого состояния и в оттаянном или оттаивающем состоянии. При этом считается, что изменение свойств мерзлых грунтов происходит при переходе из мерзлого фазового состояния в талое. В интервалах температур ниже температур замерзания-оттаивания свойства мерзлых грунтов считаются практически неизменными. Это положение не всегда может описать реальное поведение мерзлых грунтов. Изменение их свойств в условиях высоких отрицательных температур носит постепенный характер при том, что в целом сами грунты остаются в мерзлом фазовом состоянии. Интенсивность изменения свойств грунтов зависит не только от температурного режима, но и от величины нагрузок, воздействующих на них.

Приборно-методологическая база исследования свойств мерзлых грунтов имеет существенные отличия от грунтов других классов, немерзлых. В соответствии с требованиями ГОСТ 12248.7-11-2020 [2-6] и СП 25.13330.2012 [10] для расчетов оснований и фундаментов в мерзлых и оттаивающих грунтах по обоим группам предельных состояний применяются, в первую очередь, результаты изучения отдельных их физических и теплофизических свойств. Показатели механических свойств грунтов, прочности и деформируемости, определяются расчетным путем по результатам компрессионных испытаний, испытаний шариковым штампом и сдвига по поверхности смерзания с применением различных коэффициентов, учитывающих изменения температурного режима и теплофизических свойств грунтов. Такие исследования и основанные на них мониторинговые наблюдения позволяют получить достоверные данные о тепловом и теплофизическом режиме сооружений. При этом полная и объективная характеристика механических свойств грунтов оснований по результатам таких испытаний получена быть не может. Соответственно, достоверность инженерных расчетов в этом случае также снижается и, в целом, такой подход не всегда позволяет дать полную характеристику свойств мерзлых грунтов и достоверно обосновать прогноз их изменения при строительстве и эксплуатации сооружений.

Во многом это связано с тем, что мерзлые грунты имеют, в целом, более сложное, по сравнению с положениями нормативно-методических документов, строение. Они представляют собой многокомпонентные системы, в которых помимо минерального скелета, могут находиться лед, вода в жидком состоянии (незамерзшая вода), растворенные соли и газовые включения, каждая из которых оказывает свое влияние на свойства грунтов. Традиционно основное внимание при изучении мерзлых грунтов уделяется минеральной компоненте и воде в различных формах и агрегатном состоянии. Именно они являются основными составляющими мерзлых грунтов, в наибольшей степени определяющими их свойства. Влияние солей на свойства мерзлых грунтов в настоящее время также достаточно полно изучено. Состав солей, форма их нахождения, количество, все эти факторы изменяют температуру замерзания-оттаивания грунтов и тем самым оказывают существенное влияние на их свойства.

Роль газовой компоненты на строение и свойства мерзлых грунтов в настоящее время изучена в наименьшей степени. Несмотря на то, что газовая составляющая практически повсеместно присутствует в составе мерзлых грунтов, считается, что она не оказывает значительного влияния на их свойства, и детальное изучение газовых включений и их влияния на строение и свойства мерзлых

грунтов началось сравнительно недавно [1, 8, 12-17]. Имеющиеся результаты исследований показывают, что именно наличие газовых включений в мерзлых грунтах и их миграция оказывает существенное влияние на изменение свойств грунтов при нарушении условий их естественного залегания в результате температурного воздействия и действия нагрузок при том, что в целом сам грунт остается в мерзлом агрегатном состоянии.

Представления о том, что мерзлые грунты в одинаковых температурных условиях могут обладать различными свойствами, общепризнаны. Для описания этих различий используются понятия твердомерзлый и пластично-мерзлый грунт, закрепленные в нормативных документах [7], принимаемые как постоянные характеристики состава и строения грунта, которые всегда присущи ему и могут измениться только при оттаивании. В тоже время, накопленные в настоящее время данные показывают, что мерзлый грунт может менять свое состояние в результате температурного воздействия, что обусловлено изменением их строения и приводит к изменению свойств. В наибольшей степени это присуще дисперсным мерзлым грунтам, содержащим в своем составе газовые включения.

Проведенные исследования не только подтверждают возможность изменения строения и свойств мерзлых газосодержащих грунтов, но и показывают закономерности этих процессов. Исследования проводились для мерзлых дисперсных грунтов, суглинков, супесей и пылеватых песков, наиболее типичных для Арктического региона, для которых характерно содержание в количестве от долей процента до 10-15% газовых включений. Полученные результаты могут быть наглядно продемонстрированы на примере мерзлых суглинков. Грунты исследовались в условиях температур и нагрузок, соответствующих изменяющимся температурным условиям криолитозоны и внешних нагрузок, возникающих при промышленном и хозяйственном освоении региона. Методика проведенных исследований была подробно описана авторами ранее [16].

Исследованные суглинки представлены тугопластичными и полутвердыми разновидностями, суммарная влажность изменяется от 19,0 до 30,3%, плотность – от 1,90 до 2,13 г/см³, число пластичности – от 10,7 до 15,5%, показатель текучести – от 0,06 до 0,33 д.е. Характерной особенностью грунтов является не полная водо-(льдо)насыщенность, коэффициент водонасыщения составляет 0,91-0,97, т.е. эти грунты содержат в своем составе газовую компоненту. Температура начала заморзания-оттаивания –1,4°C.

Повышение температуры мерзлых грунтов в области отрицательных значений вызывает выделение содержащегося в них газа. Динамика этого процесса показана на Рис. 1. Процесс газовой выделению начинается при температуре грунта –5°C, при повышении температуры продолжается, достигает своего максимума при температуре –2°C, после чего его интенсивность снижается. Температура начала газовой выделению и его пиковой интенсивности зависит от напряженного состояния грунта. Температура начала выделению газа постепенно снижается при увеличении величины объемного сжимающего давления от –7°C при давлении 0,05 МПа до –8°C (при давлении 0,2 МПа). Наибольшая интенсивность газовой выделению при действии нагрузок также наступает при более низких температурах, ниже температуры заморзания-оттаивания грунта: –3°C при давлении 0,05 МПа, –4°C при давлении 0,1 и 0,2 МПа.

Выделение газов в мерзлых грунтах при изменении температуры и напряженного состояния приводит к изменению их строения. В результате газовой выделению, при росте температуры под действием сжимающих нагрузок происходит увеличение плотности и степени водо-(льдо)насыщения и снижение пористости грунтов. Изменение строения грунтов, в свою очередь, вызывает закономерное изменение их прочностных свойств, показанное на Рис. 2 на примере величины угла внутреннего трения.

Изменение прочности мерзлых газосодержащих грунтов под действием температурного фактора происходит закономерно, в соответствии с характером газовой выделению в них. Снижение прочностных свойств начинается и протекает при отрицательных температурах, ниже температуры оттаивания, и интенсивность этого процесса зависит от напряженного состояния грунтов при газовой выделению. При свободном газовой выделению снижение прочности начинается при температуре –5°C и показатели прочности достигают своих минимальных значений при достижении температуры оттаивания. При газовой выделению под действием нагрузок в 0,05-0,2 МПа прочностные свойства начинают снижаться уже при температурах от –8°C до –7°C, наиболее активно продолжают до температур от –5°C до –4°C и при повышении температуры до –3°C... –2°C достигают минимальных значений.

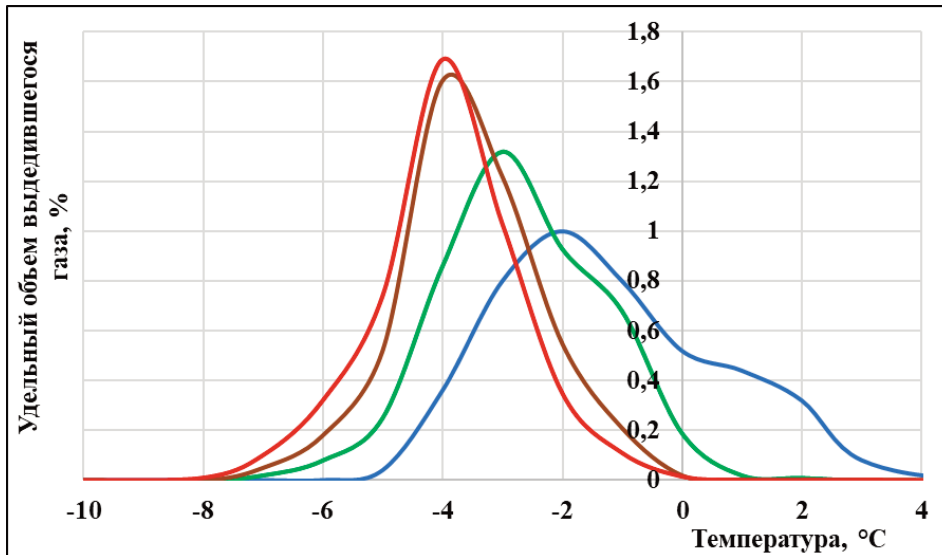


Рис. 1. Зависимость удельного объема выделившегося газа от температуры для суглинков при изменении напряженного состояния грунта:

- свободное газовыделение; — объемное давление 0,05 МПа;
- объемное давление 0,1 МПа; — объемное давление 0,2 МПа.

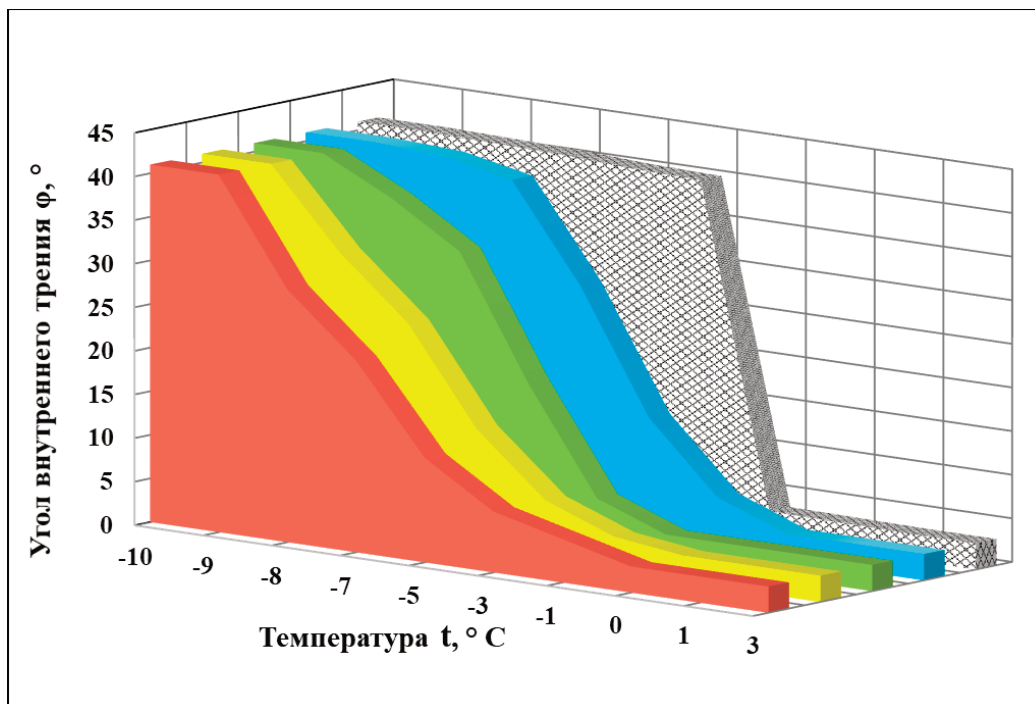


Рис. 2. Изменение величины угла внутреннего трения суглинков при изменении температуры и напряженного состояния грунта:

- ▨ – прогнозное по нормативным методикам;
- реальное изменение при газовыделении:
- свободное газовыделение;
- объемное давление 0,05 МПа;
- объемное давление 0,1 МПа;
- объемное давление 0,2 МПа.

Приведенные данные показывают, что снижение прочности мерзлых газосодержащих грунтов происходит при температурах ниже температуры оттаивания, то есть в условиях, при которых грунт в целом остается в мерзлом состоянии. Процесс газовыделения, с одной стороны, служит индика-

тором деградации прочности грунтов, с другой стороны, интенсивность снижения прочностных свойств грунтов зависит от количества газовых включений в них. Последнее утверждение подтверждается данными, представленными на Рис. 3, показывающими, что в одинаковых температурных условиях прочностные свойства одного и того же грунта зависят от содержания в них газов. Снижение прочности грунтов начинается уже при 2%-ном содержании газовой компоненты, при его увеличении до 5% интенсивность снижения прочности усиливается и при увеличении содержания газов до 8-10% и выше протекает наиболее интенсивно.

Несомненно, такое изменение свойств грунтов обусловлено изменением их строения, происходящим в результате газовыделения, развивающегося при высоких отрицательных температурах, что обусловлено изменением состояния и свойств диффузного слоя гидратных пленок глинистых частиц грунта (β -пленок) в этих условиях. Этот процесс был рассмотрен авторами ранее [8], он заключается в том, что при повышении отрицательной температуры грунт происходит оттаивание β -пленок. В результате, при том, что в вода в порах грунта остается в мерзлом состоянии, между глинистыми частицами появляется прослойка воды (гидратные пленки), что оказывает непосредственное влияние на изменение прочностных свойств грунта в целом. Интенсивность этого процесса зависит от количества глинистых минеральных частиц в составе грунта.

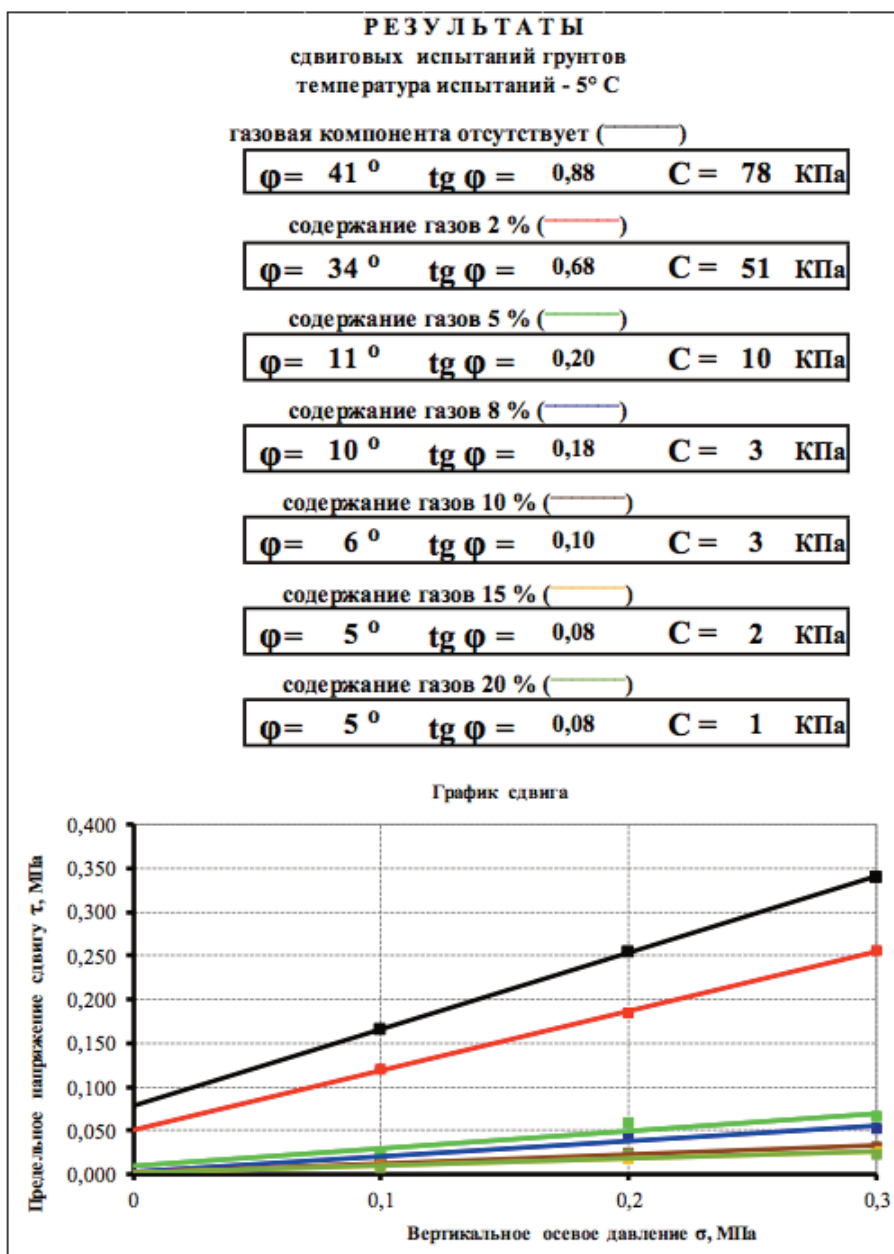


Рис. 3. Изменение прочностных свойств мерзлых суглинков в зависимости от содержания в них газов.

Приведенные данные показывают, что мерзлые грунты, практически повсеместно содержащие газовую компоненту в своем составе, являются многокомпонентными подвижными системами, чутко реагирующими на изменения условий своего залегания и внешние воздействия. В результате изменения геокриологических условий меняется внутреннее строение мерзлых грунтов, что закономерно приводит к изменению их свойств. Интенсивность таких изменений усиливается при увеличении напряженного состояния грунтов, возникающего в результате возрастания техногенной нагрузки при активизации хозяйственной деятельности в арктическом регионе. Характеристика реакции мерзлых грунтов на изменение состояния геокриолитозоны не может быть определена при их изучении по стандартным методикам, регламентируемым действующими нормативными документами, и, следовательно, эти данные не могут быть учтены при проектировании и строительстве инженерных сооружений и объектов. Для преодоления этого, расчеты несущей способности грунтов и прогноз их изменения должны проводиться на основе результатов исследований, дающих наиболее полную и объективную характеристику свойств грунтов и обоснованный объективный прогноз их изменения. В настоящее время такими методами являются сдвиговые испытания грунтов и испытания в условиях трехосного (объемного) сжатия. Такие исследования должны проводиться в условиях напряженно-деформированного состояния и температур, соответствующих современному естественному состоянию и их возможного изменения. Такие условия должны определяться на основе районирования территории, типизации объектов инфраструктуры (основные типы инженерных сооружений и характеристика воздействия, характера и величины нагрузок на грунты оснований от них) и прогноза изменения состояния криолитозоны. Проведение таких исследований должно в конечном итоге позволить повысить безопасность строительства и эксплуатации инженерных объектов и сооружений в геокриолитозоне и стать основой их адаптации к изменению ее состояния.

Литература

1. Богоявленский В.И. Выбросы газа из криолитозоны полуострова Ямал // *Бурение и нефть. №7-8 (163-164) июль-август 2015. с. 8-13.*
2. ГОСТ 12248.7–2020 *Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов методом испытания шариковым штампом. М., Стандартинформ, 2020. 12 с.*
3. ГОСТ 12248.8–2020 *Грунты. Определение характеристик прочности мерзлых грунтов методом среза по поверхности смерзания. М., Стандартинформ, 2020. 15 с.*
4. ГОСТ 12248.9–2020 *Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов методом одноосного сжатия. М., Стандартинформ, 2020. 22 с.*
5. ГОСТ 12248.10–2020 *Грунты. Определение характеристик деформируемости мерзлых грунтов методом компрессионного сжатия. М., Стандартинформ, 2020. 14 с.*
6. ГОСТ 12248.11–2020 *Грунты. Определение характеристик прочности оттаивающих грунтов методом среза. М., Стандартинформ, 2020. 14 с.*
7. ГОСТ 25100–2020 *Грунты. Классификация. М., Стандартинформ, 2020. 41 с.*
8. Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Фролов С.И., Собин Р.В. Влияние на свойства глинистых грунтов изменений свойств гидратных пленок при температурных воздействиях // *Геозкология. 2021. № 1. С. 69-78.*
9. СП 22.13330.2016 *Свод правил. Основания зданий и сооружений. М.: Стандартинформ, 2016. 225 с.*
10. СП 25.13330.2012 *Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Стандартинформ, 2021. 110 с.*
11. СП 446.132580.2019 *Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. М.: Стандартинформ, 2019. 78 с.*
12. Перлова Е.В. Особенности газосодержания многолетнемерзлых пород на примере северо-западной части п-ва Ямал, Дисс. на соискание звания канд. г.-м. н. М., МГУ, 2001. 178 с.
13. Чувиллин Е.М., Перлова Е.В. Формы нахождения и условия формирования газовой компоненты мерзлых пород. *Вестн. Моск. Ун-та. сер. 4. Геология. 1999. № 5.*
14. Чувиллин Е.М., Перлова Е.В., Дубиняк Д.В. Экспериментальное моделирование условий существования газовых гидратов в морских отложениях п-ова Ямал. В сб. *Материалы Второй конференции геокриологов России, т. 1. М. 2001. с. 169-173.*

15. Якушев В.С. Состав, строение и свойства мерзлых гидратонасыщенных отложений. Дисс. на соискание звания канд. г.-м. н. М. МГУ. 1991. 132 с.
16. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kotov, P.I., Sobin R.V. Investigation of the Dynamics of Gas Emission from Frozen Soils with Change in Temperature and Pressure. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2020, Vol. 57, no. 4., P. 305–311.
17. Sergeev D., Khimenkov A., Tipenko G., Vlasov A., Cauquil E., Green E., Dauboin P., Stanilovskaya J., Mnushkin M. Yamal Craters: State of Knowledge and Wished In-situ Investigations. XI. *International Conference on Permafrost 20 – 24 June 2016. Potsdam. Germany* p. 997.

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И БИОИНДИКАЦИЯ ЛАНДШАФТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Ю.В. Клокова, И.Г. Петрова, И.Г. Ковязин

Уральский государственный горный университет, 620014, Свердловская обл., г.Екатеринбург, ул.Хохрякова, 85А.
E-mail: julia.klokova@mail.ru

Изучение экологических условий территорий месторождений полезных ископаемых или перспективных участков рудопроявлений в обязательном порядке включает оценку эколого-ландшафтных условий, определение границ природных комплексов и выявлении участков проявления экзогенных процессов. При значительных площадях проектируемого освоения, ограниченных сроках проведения работ, плохой проходимости и сложности картирования границ ландшафтов, получение данной информации затруднено и актуальным становится использование дистанционных методов, позволяющих оптимизировать объем полевых исследований.

Карты ландшафтов и растительности, являются неотъемлемой составляющей экологических карт и необходимы на разных этапах освоения месторождений. На основе анализа картографических материалов производится расчет потерь мест обитания животных, площади отчуждаемых земель и ущерба лесному фонду с учетом бонитета. В итоге документ ОВОС является инструментом, который распознает, прогнозирует и анализирует виды воздействия на физическую среду, а производимые расчеты необходимы для информирования лиц, принимающих проектные решения, и общественности об экологических последствиях реализации предлагаемого проекта.

Целью работы являлось использование автоматизированная идентификация растительности, выделение границ природных и техногенных ландшафтов, и картирование участков проявления экзогенных процессов, включая заболачивание, с помощью анализа мультиспектральных космоснимков с последующей обработкой в пакете программ ArcGIS. Дифференциация растительного покрова с учетом морфологических особенностей рельефа, позволяет выделить ландшафты с однородным рельефом, почвенными и микроклиматическими условиями. Преимущества картирования природных ландшафтов и растительности с помощью мультиспектральной космической съемки заключаются в широком ее охвате, достаточной детальности и периодичности наблюдений.

Задачами геоэкологического картографирования на основе биоиндикации природных ландшафтов и оконтуривания нарушенных территорий являлись:

1. предварительное дешифрирование космоснимков, что позволит наметить будущие ключевые участки описания;
2. полевое обследование ключевых участков ландшафтов с фотофиксацией и покомпонентным описанием территории;
3. нанесение координат ключевых участков на космоснимок и определение значений интенсивности отраженных длин волн;
4. выделение доминирующих видов растительности и их границ по соответствующим значениям интенсивности;
5. оконтуривание участков развития заболачивания по геоботаническим индикаторам с учетом рельефа.

Решение данных задач было реализовано в Хабаровском крае на участке горного отвода месторождения и прилегающей территории потенциального воздействия проектируемого горнодобывающего предприятия. Месторождение располагается на левобережье нижнего течения р.Амур, рельеф территории низкогорный среднерасчлененный (абсолютные отметки от 60 до 450 м), относится к денудационным предгорьям с холмисто-увалистыми формами, с пологими, часто ассиметричными склонами с широкими часто заболоченными равнинами. На севере исследуемого участка проявлены такие заболоченные равнины. Установлено что площадь характеризуется плохой проходимостью и сложным строением растительного покрова.

Задача 1. На предполевым этапе для того, чтобы наметить местоположение ключевых участков описания ландшафтов, были проанализированы космоснимки, ретроспективные и современные

топопланы и карты территории, а также сведения о природных и техногенных условиях района, обобщенные в научно-исследовательских работах и научно-технической литературе. По результатам этих работ предварительно было установлено, что в районе исследований растительность представлена формациями:

- смешанные лиственные и хвойно-лиственные;
- мелколиственные леса;
- пихтово-еловые;
- лиственничники.

Согласно вышеизложенной дифференциации, были заложены ключевые участки – площадки комплексного описания ландшафтов (ПКОЛ) в границах территории месторождения.

Задача 2. Полевое обследование производилось при проведении пеших маршрутных исследований. На контрольных площадках выполнялись детальные наблюдения, измерения, описания, сбор гербарного материала т.п. По маршруту и на площадках фиксировались все ландшафтные границы и проявления антропогенной нарушенности территории, изменения в растительном покрове. Производилось фотографирование каждой ПКОЛ и характерных растительных сообществ.

По результатам полевого обследования дополнительно были выделены в границах равнинных поверхностей и пойм водотоков выделы растительности, с характерным заболачиванием территории, а также площади развития техногенных ландшафтов.

Таким образом, установлено, что северо-западная часть участка представляет собой маревый ландшафт, она занята кустарниково-сфагновыми болотами с редкой лиственницей, и березково-багульниковыми и багульниковыми зарослями с редкой лиственницей на месте сгоревших багульниковых лиственничников у подножья склонов.

Техногенный ландшафт представляет собой территории, лишенные почвенно-растительного покрова (в границах проектируемого карьера и производственных площадок), участки самозарастания отвалов и отстойников добычи россыпного золота и лесозаготовочные просеки.

Задача 3. По результатам анализа полевых материалов были выделены характерные точки существующих природных комплексов, которые были вынесены на композит космоснимка участка для дальнейшего изучения (Рис. 1).

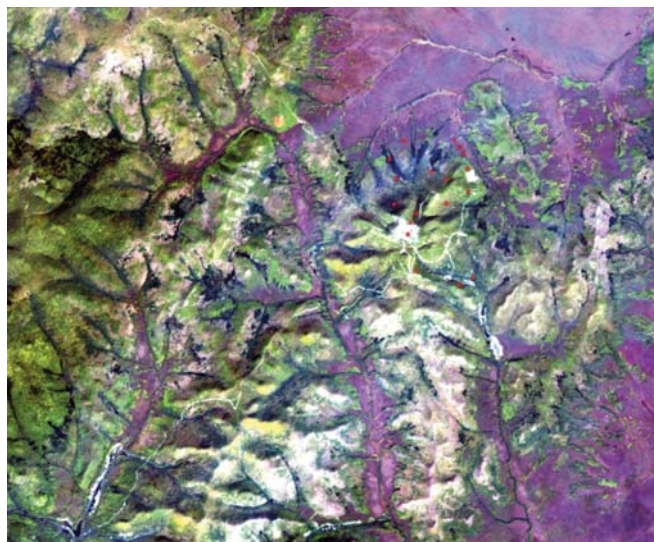


Рис. 1. Космоснимок участка с ключевыми участками (композит в естественных цветах) М1:10000.

Далее анализ производился на базе многоспектрального снимка спутника Landsat 8, который был снят в период полевого обследования. Суть многоспектральных снимков сводится к измерению энергетических и поляризационных характеристик излучения объектов в различных диапазонах электромагнитного спектра. Величины излучения тех или иных природных объектов зависят от многих факторов: величины влажности, обилия растительности, рельефа и экспозиции склонов, наличия тектонических структур и центров вулканизма, а также от антропогенного вмешательства [4]. Используемый снимок включал в себя 9 каналов, однако для наших целей наиболее показательными являлись сочетания 4 каналов (табл. 1).

Таблица 1.		
Используемые каналы Landsat 8		
Канал	Длина волны, мкм	Разрешение (размер 1 пикселя)
Канал 4 – Красный (Red)	0,630 – 0,680	30 м
Канал 5 – Ближний ИК (Near Infrared, NIR)	1,845 – 1,885	30 м
Канал 6 – Ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 2)	1,560 – 1,660	30 м
Канал 7 – Ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 3)	2,100 – 2,300	30 м

Затем для каждой ключевой точки установлено значение интенсивности отраженного света в каждом из 4 спектральных диапазонов. По полученным значениям был построен график изменения длины волны в различных спектрах (Рис. 2).

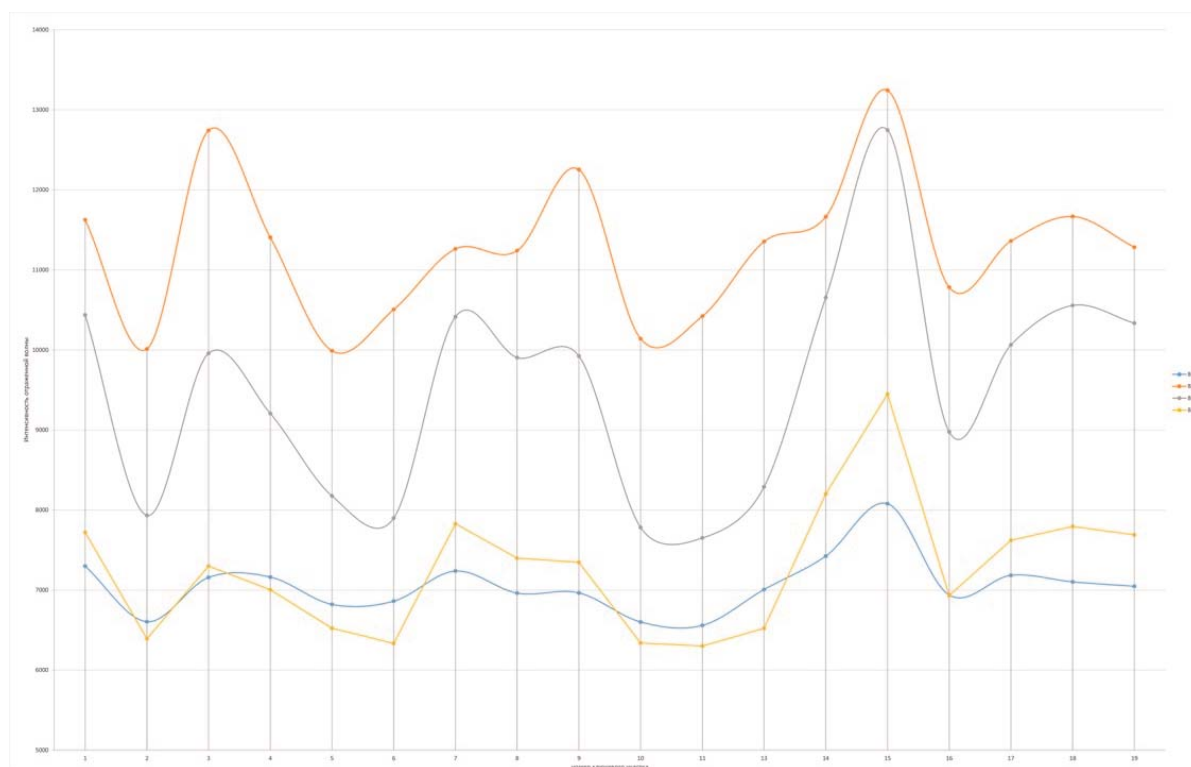


Рис. 2. График изменения длины волны в различных спектрах.

Задача 4. Вычисленные по графику диапазоны изменения длин волн для 4 каналов позволили выделить на космоснимке зоны распространения конкретного растительного сообщества. Так, например, была выделена пихтово-еловая формация, которая распространена преимущественно в поймах малых и больших водотоков и у подножия пологих склонов (Рис. 3).

Таким образом было проанализировано все шесть типов растительности, выделенной на участке. В результате был получен композит космоснимка, отражающий распределение типов растительности на исследуемом участке (Рис. 4).

Используя композит индекса влажности NDWI, выделили зоны с повышенной влажностью грунтовой толщи, характеризующиеся слабой дренируемостью ландшафта. Комплексирование полученных композитов позволило оконтурить участки заболоченности и антропогенной нарушенности.

Задача 5: выявление контуров заболачивания территории, была выполнена путем сопоставления карты растительности и рельефа территории. Таким образом, к заболоченным участкам отнесены зоны развития кустарниково-осоково-моховой растительности с редкой лиственницей с абсолютными отметками рельефа ниже 140 м.

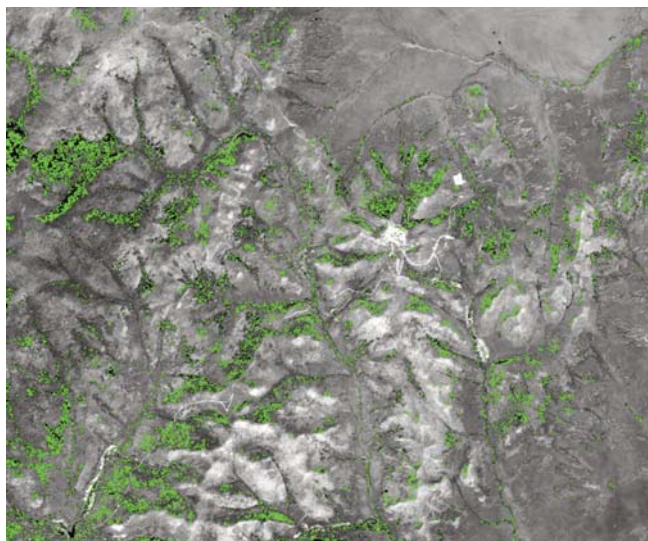


Рис. 3. Космоснимок с участками развития пихтово-еловой растительности (зеленым обозначены выделенные зоны) М1:10000.

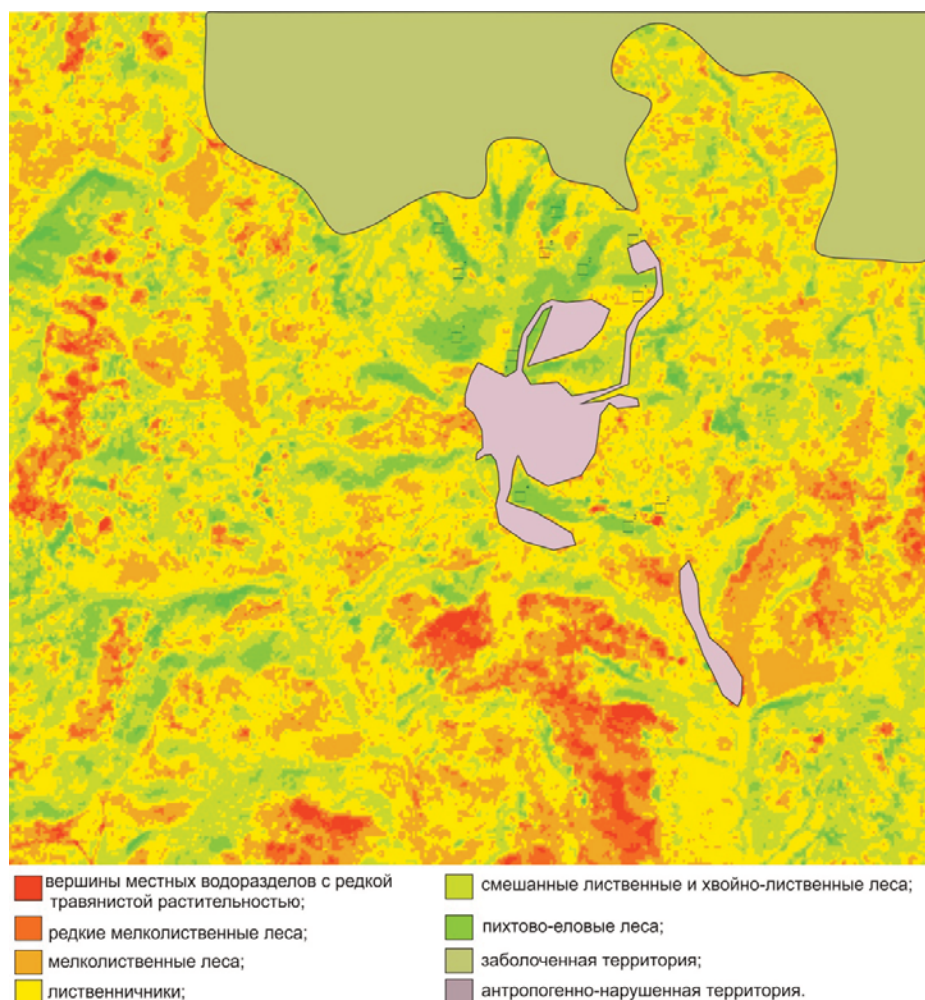


Рис. 4. Космоснимок, отражающий распределение типов растительности М1:10000.

В данной работе рассмотрен опыт анализа мультиспектральных космоснимков территории золоторудного месторождения для дифференциации ландшафтов, идентификации растительности и оконтуривания участков заболачивания по геоботаническим индикаторам. В результате произведенных работ были выделены и оконтурены доминирующие виды растительности, а также участки

развития заболачивания по геоботаническим индикаторам с учетом рельефа. Полученная схема распространения типов растительности является основой для построения комплекта геоэкологических карт включая ландшафтную, техногенной нагрузки и местообитания животных. Благодаря применению метода анализа мультиспектральных космоснимков с последующей обработкой в пакете программ ArcGIS, был оптимизирован объем полевых работ, и получены уникальные не четко картируемые при проведении полевых исследований, данные о ландшафтно-экологических условиях участка.

Литература

1. Балдина Е.А., Грищенко М.Ю. Методика дешифрирования разновременных космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне // Вест. МГУ. Сер. 5. География. 2014 № 3. С. 35-42.
2. Грязнов О. Н., Петрова И. Г., Стороженко Л. А.. Геоэкологическое районирование освоенных территорий. Екатеринбург: Известия УГГУ, 2017. Вып. 4(48). 7-13 с.
3. Методические рекомендации по составлению эколого-геологических карт масштаба 1:20000-1:100000. М.:ВСЕГИНГЕО, 1996. 61 с.
4. Токарева О. С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. Томск: Издательство ТПУ, 2010, 148 с.
5. Хорошев А.В., Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н. Современное состояние ландшафтной экологии. Изв. РАН. Сер. геогр. 2006 № 5. С. 12-21.

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ МАССИВА МПИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МЕТОДОВ

С.А. Корчак, И.А. Савинцев, В.С. Козлов, И.Г. Петрова

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,
620144, Свердловская обл., г.Екатеринбург, ул.Хохрякова, д.85, каб.3302.
E-mail: gingeo@mail.ru

Актуальность

В условиях стремительных темпов освоения месторождений твердых полезных ископаемых (МТПИ) возникает потребность в получении надежных данных об инженерно-геологических условиях (ИГУ) их отработки. Оценка и прогноз инженерно-геологических условий карьерных и шахтных полей базируется на закономерностях формирования и пространственной изменчивости тех компонентов, которые определяют способ вскрытия месторождения, устойчивость откосов бортов карьеров, проявление инженерно-геологических процессов, а также эффективность и безопасность ведения горных работ. В массивах скальных горных пород важнейшим природным компонентом является тектоническая обстановка месторождений и связанная с ней, нарушенность, трещиноватость и блочность пород [1].

Методика

Оценка степени и характера трещиноватости массива на стадии разведки МТПИ основывается на получении качественных и количественных характеристик по керну скважин. Традиционным методом является описание керна геологоразведочных и специальных инженерно-геологических скважин [5]. В настоящий момент существует ряд альтернативных методов, позволяющих изучить трещиноватость массива обеспечивающих большую точность и надежность. К одному из таких методов относится инженерно-геологическая документация ориентированного керна. Данный метод позволяет получить пространственные параметры трещин, которые зачастую являются ключевыми факторами при оценке устойчивости массива, вскрываемого горными выработками.

Итогом изучения трещиноватости на МТПИ по неориентированному керну является получение данных о степени и характеру трещиноватости на основании которых прогнозные инженерно-геологические модели МПИ строятся по предложенным регламентным методикам [2,6] без учета ориентировки структурно-тектонических особенностей месторождения.

Однако при всех достоинствах метода получения характеристик трещиноватости по неориентированному керну, отсутствует какая-либо возможность получить важнейшие параметры трещин – их пространственная ориентировка (азимуты и углы падения). Немаловажным фактором, обуславливающим необходимость применения ориентированного керна, является наличие толщ осадочных или метаморфических горных пород, в пределах которых могут отмечаться протяженные поверхности ослабления по напластованию/сланцеватости пород. Эти поверхности могут иметь падение как в сторону выработанного пространства, так и в сторону массива горных пород. Это необходимо учитывать при выборе расчетной схемы для каждого борта карьера индивидуально. Ориентированный керн в данном случае позволит получить не только пространственные характеристики трещин, но и подробно изучить структурные особенности массива.

Результаты

Описываемая методика нашла практическое применение на одном из месторождений в Хабаровском крае, где скальный массив сложен интрузивным, терригенно-осадочными и метасоматически измененными породами. Перекрывают нижний этаж дисперсные грунты элювиально-делювиального и элювиального происхождения.

Для оценки трещиноватости массива горных пород на стадии разведки последовательно использовались 2 метода: 1) инженерно-геологическая документация неориентированного керна; 2) инженерно-геологическая (геомеханическая) документация ориентированного керна.

Инженерно-геологическое описание неориентированного керна позволило получить основные качественные (характер поверхности трещин, состав и мощность заполнителя) и количественные характеристики трещиноватости (модуль кусковатости (Mк), модуль трещиноватости (Mt), показатель качества пород (RQD), коэффициент зон ослабления и размер элементарного структурного блока (L)), с использованием рейтинговых классификаций [2,6]. В данном случае использована классификация ВСЕГИН-ГЕО [3], которая позволяет выполнить инженерно-геологическое районирование проектируемого карьерного поля по условиям устойчивости к вскрытию его горными выработками (табл.1, Рис. 1).

Таблица 1.					
Классификация пород по степени трещиноватости					
Категория пород по степени трещиноватости	Mt,тр/м	Mк, кус/м	RQD,%	Размер элементарного структурного блока L, м	Коэфф/ зон ослабления д.е.
Слаботрещиноватые	< 3	< 5	> 75	> 0,15	< 0,05
Среднетрещиноватые	3-7	5-10	50-75	0,08-0,15	0,05-0,20
Сильнотрещиноватые	7-15	10-15	25-50	0,05-0,08	0,20-0,40
Раздробленные	> 15	> 15	< 25	< 0,05	> 0,40



Рис. 1. Фрагмент прогнозного инженерно-геологического разреза одного из участков месторождения.

Второй метод в настоящее время позволяет расширить систему знаний о характере трещиноватости массива пород в направлении определения элементов залегания трещин (азимута и угла падения), что позволяет устанавливать положение поверхностей и зон ослабления и учесть их при

выполнении инженерно-геологического районирования. Это и было выполнено по ряду скважин с ориентированным керном. Полученные данные обрабатывались в программном комплексе Dips Rocscience Inc., где выделялись главные и второстепенные системы трещин (Рис. 2, табл.2).

Таблица 2.		
Пространственные характеристики систем трещин		
Система трещин	Основные элементы залегания системы трещин	
	Азимут падения	Угол падения
I система	193-227°	40-67°
II система	3-48°	20-40°
III система	68-88°	55-75°
подсистема – I	192-226°	40-68°
Борт карьера	300-350	32 (откосы: 45-65)

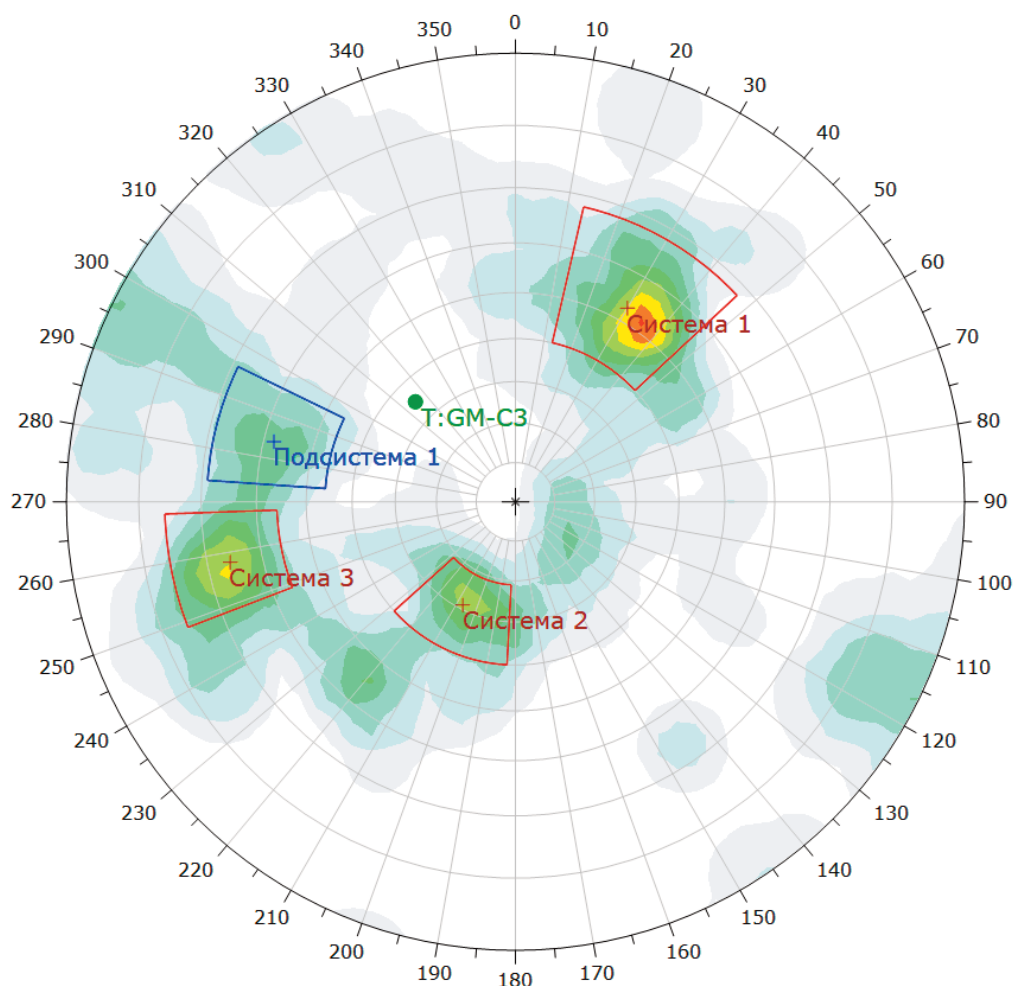


Рис. 2. Стереодиаграмма открытой трещиноватости массива по скважине С-3 (проекция на нижнюю полусферу).

По полученным результатам схема инженерно-геологического районирования была уточнена. Участок массива, отнесенный ко второму и первому классам устойчивости (Рис. 1) – устойчивые и весьма устойчивые породы, будет классифицироваться как слабоустойчивый из-за наличия системы трещин – II. Несмотря на высокие значения прочностных характеристик, ключевую роль в данном случае играет указанная система трещин, по которой возможно разрушение массива путем

плоского сдвига блоков пород по поверхности трещин. Данный факт необходимо учесть при выборе расчетной схемы устойчивости [4].

Выводы

Таким образом, прогнозная модель, построенная по результатам инженерно-геологического изучения неориентированного керна, была дополнена важнейшими параметрами, отражающими пространственную ориентировку главных систем трещин и поверхностей ослабления, а также условий залегания пород в прибортовой части массива. Выполненные исследования являются надежной основой для выбора расчетных схем для каждого из участков массива, а также для каждого конструктивного элемента будущего карьера [4].

Литература

1. *Абатурова И.В. Научно-методические основы изучения, оценки и прогноза инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых в скальных массивах: докт.дис. – Уральский государственный горный университет. Екатеринбург – 2012 г.*
2. *Булычев Н.С. Механика подземных сооружений: учебник для Вузов.-2-е изд., М //Недра. – 1994.*
3. *ВСЕГИНГЕО. Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых / М.: Недра, 1986. - 171 с.*
4. *Фисенко Г.Л. и др. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров //Л., ВНИМИ, 1972 г., 165 с.*
5. *Чернышев С.Н. Трещиноватость горных пород и ее влияние на устойчивость откосов. – 1984 г.*
6. *Laubscher D.H., Jakubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses //Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies, WA Hustrulid and RL Bullock (eds) Society of Mining Metallurgy and Exploration, SMME. – 2001. – С. 475-481.*

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГРУНТОВ ШЕЛЬФА

А.С. Локтев

ООО ЦМИ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Ленинские горы, 1, стр.77.
E-mail: andreiloktev@mail.ru

Морские исследования грунтов являются составной частью инженерно-геологических изысканий, активно и широко выполняемых со второй половины XX века при проектировании различных гидротехнических сооружений, в первую очередь объектов нефтегазовой структуры. Основная цель исследований – получение достоверных и достаточных данных о строении грунтовой толщи, включая определение различных параметров и свойств грунтов.

Выполнение работ на море (преимущественно на континентальном шельфе, в частности, шельфе Арктических морей) имеет специфику и существенные отличия, относительно изысканий на суше [4]. К наиболее важным можно отнести:

- ограниченный период возможных исследований и сложные природные условия работ (некоторые районы доступны для работ менее одного месяца в году);
- удаленность объектов исследований от инфраструктуры (переходы в район работ могут составлять несколько недель);
- отделение объекта изучения от исследователя толщиной морской воды (глубина моря может превышать 300 м);
- особые условия для навигационно-геодезического обеспечения (в полярных широтах плохо работает даже спутниковая навигация, также необходимо использовать подводную навигацию);
- длительный срок хранения и транспортировки проб (экспедиции могут длиться несколько месяцев) и др.

Кроме собственно природных факторов существуют ограничения необъективного характера, связанные с процедурами получения разрешений, организацией работ на море, обеспеченностью судами-носителями, оборудованием и даже нормативной и законодательной базой таких исследований, отсутствием региональных инженерно-геологических данных.

Изыскания на шельфе выполняются обычно комплексно (различные виды работ и оборудование четко распределены на одном или нескольких судоходных носителях, время работ жестко регламентировано, включая очередность; используется универсальное оборудование, выполняются одновременно различные виды исследований, привлекаются различные организации и исполнители). Сложность организации морских изысканий и их значительная стоимость требуют высокой технологичности, ремонтпригодности и надежности оборудования [3]. Как правило, применяются более современные технические средства; на борту имеются дубликаты основных узлов или двойной комплект оборудования, достаточное количество расходных материалов и запасных частей.

Морские исследования выполняются со специализированных судов или приспособленных под конкретный проект носителей. Это могут быть баржи, понтоны, катера и другие переоборудованные суда. Регулирование и возможность их применения регламентируется Российским морским регистром судоходства (РМРС). Выбор пригодного плавсредства определяется задачами исследований (виды и объемы работ, глубинность исследований, наличие грузоподъемного оборудования, количество посадочных мест, автономность, силовые установки, система позиционирования судна, ограничения по погоде).

Грунты на шельфе могут быть исследованы «прямыми» или «косвенными» методами. К первым относятся «инвазивные», геотехнические работы, при которых происходит воздействие на естественный грунт и его физическое разрушение: инженерно-геологическое бурение, донный проботбор, испытания грунтов «в массиве» (полевые испытания *in situ*), а также лабораторные исследования [4, 5]. Использование геофизических методов (не инвазивных, «косвенных») не приводит к механическому разрушению грунтов или грунтовой толщи, и позволяет оценивать реакцию толщи и отдельных слоев на воздействие различных физических полей.

Современный отечественный и зарубежный опыт подразумевает широкое использование гео-технических, эффективных методов исследования грунтовой толщи, с определением ее физико-механических характеристик в естественных условиях [5]. Такие методы являются приоритетными особенно на этапе проектирования, размещения локальных объектов на участке [6-9]. Бурение и пробоотбор выполняются на всех этапах изысканий (от региональных и рекогносцировочных до детальных работ), так как носят универсальный характер и позволяют исследовать грунтовую толщу с последующим изучением грунтов в лабораториях (стационарных и судовых).

Использование различных геофизических методов (непрямых) позволяет получать также исключительно важную информацию о строении грунтовой толщи, распространении отложений и геологических опасностях, но, как правило, не позволяет получать количественные характеристики, а преимущественно качественные или пространственно-количественные (мощность, протяженность) (табл. 1).

<i>Таблица 1.</i>								
Применимость основных методов полевых исследований морских грунтов								
Наименование характеристик грунта	CPT/CPTU	ТСРТ	VT	PT/DT	SCPT	ИГБ+лаб	ЛТС+лаб	Геофизические методы
Определение строения грунтовой толщи	A	нет	B-C	C-D	A-B	A	A	НСП, СУВР, ССВР, ВЭЗ, ЭР, ВСП, ЭХО, АП,
Определение локальной неоднородности, тектонических нарушений и современной активности	C-D	нет	нет	нет	D	C-D	D	ВЭЗ, МОВ, ВСП, СДМС, СВР, ССВР, СУВР, НСП, ММС, СК
Распространение ММП	D	B-C	нет	нет	B-D	A-B	C-D	T, ВЭЗ, ЭР, ВСП
Вид грунта	A	нет	C-D	D	D	A	A	-
Угол внутреннего трения	A-B	нет	нет	C-D/нет	нет	A-B	A-B	-
Степень плотности	A-B	нет	нет	D/C-D	нет	B	B	-
Недренированное сопротивление сдвигу	A-B	нет	A	C-D	нет	A-B	A-B	-
Поровое давление	A	нет	нет	нет/C	нет	B-C	B-C	-
Коэффициент переуплотнения (OCR)	A-B	нет	B-C	D/C-D	нет	A-B	A-B	-
Модуль деформации	B	нет	нет	A-B	нет	A-B	A-B	ВСП, ВЭЗ
Коэффициент фильтрации	B-C	нет	нет	нет	нет	A-B	A-B	-
Разжижаемость	A-B	нет	нет	D/C-D	нет	A-B	A-B	-
Температура	нет	A	нет	нет	нет	B-C	C-D	T
Скорость продольной/поперечной волны	нет	нет	нет	нет	A-B	B-C	C-D	ВЭЗ, ВСП, СК, СДМС
<p>Примечания. 1. Аббревиатуры: CPT/CPTU-статическое зондирование, ТСРТ-температурное зондирование, VT-испытание скважинной крыльчаткой, PT/DT-испытание прессиомером/ дилатометром, SCPT – сейсмическое зондирование, ИГБ+лаб/ЛТС+лаб- инженерно-геологическое бурение и пробоотбор с лабораторными исследованиями грунта; СДМС – сейсморазведка донными многокомпонентными системами, НСП – непрерывное сейсмопрофилирование, СУВР/ ССВР/ СВР- сейсмика ультравысокого/сверхвысокого/высокого разрешения, ВЭЗ-вертикальное электрозондирование, ВСП-вертикальное сейсмопрофилирование, ЭХО-эхолотирование, АП-акустическое профилирование, СК – сейсмический каротаж, ММС - морская магнитная съемка, T-термометрия, ЭР – электроразведка, ММП-многолетнемерзлые породы.</p> <p>2. Латинскими буквами обозначен уровень применимости (табл. 2)</p>								

Как следует из табл. 1, геофизические методы включают различные сейсмические, сейсмоакустические, ультразвуковые, магнитометрические, термометрические и электроразведочные способы и технологии. Здесь систематизирован опыт полевых исследований на шельфе и требования основных нормативных документов [3, 7, 8, 10].

Очевидно, что различные геофизические методы позволяют получать данные о строении грунтовой толщ, картировать различные геологические опасности, недоступные для геотехнических работ. Сейсмическое и сейсмоакустическое профилирование наиболее широко распространены ввиду их эффективности и производительности в морских условиях. Современные тренды и технологии позволяют комплексировать несколько разных способов за один проход по профилю. Имеются методики получения количественных характеристик (физико-механических свойств) грунтов по результатам геофизических исследований, но их следует считать прогнозными. Они могут служить для оценки состава и свойств на ранних этапах изысканий, так как подобные зависимости основаны на различных корреляциях и аппроксимациях при измерении единичных параметров (скорости, электрического сопротивления и др.), и не соответствуют требованиям нормативных документов [1-3].

Существенным недостатком геофизических методов также являются «осреднение» параметров по толще отложений, условно сопоставляемой с геологическими слоями или инженерно-геологическими телами. Такое ограничение несущественно только при вертикальном каротаже, как правило, выполняемом в скважине. При проведении вертикальных электрического профилирования или зондирования (ВЭЗ, ВСП) или температурного зондирования достигается четкое и достоверное разделение границ по глубине. Термозондирование представляется основным методом измерения температуры при мониторинге субаквальной криолитозоны, так как уже имеются технические средства и опыт продолжительных (не единичных) измерений температуры в арктических морях с использованием термокос. В отличие от ТСРТ термокоса может быть «захоронена» в грунтовой толще на шельфе для многократных циклических измерений (на месяцы или даже годы) при дистанционном их считывании.

Преимущество полевых испытаний грунтов (in-situ) заключается в возможности получения характеристик в естественном, ненарушенном сложении, что особенно важно для песков, грубозернистых грунтов, а также слабых глинистых отложений, восстановление природно-напряженного состояния которых в лабораторных условиях проблематично. Преимущество таких видов исследований заключается также в минимальном нарушении толщи (важно при постановке гидротехнических сооружений с опорами), при стандартном диаметре зондов 36мм; высокой производительности работ (стандартная скорость пенетрации 2см/с); возможности непрерывного измерения параметров на глубину в десятки метров; высокой повторяемости и разрешающей способности методов.

Самым распространенным методом морских исследований грунтов является статическое зондирование, как правило, с использованием датчика порового давления (СРТУ). Измерение порового давления обязательно для водонасыщенных отложений, так как оно может быть соизмеримо с измеряемой величиной удельного сопротивления конуса (лобового сопротивления), и без соответствующей корректировки результаты могут оказаться существенно искаженными [3, 5]. Выполнение СРТ без использования датчика порового давления допустимо только при выполнении общей оценки строения грунтовой толщи (без определения свойств) [8].

Универсальным и самым распространенным методом исследований грунтов шельфа при инженерных изысканиях остается бурение и пробоотбор легкими техническими средствами (ЛТС), которые позволяют отбирать керн и пробы грунтов на необходимую глубину и без «пробелов». Глубина скважин на шельфе обычно составляет десятки метров и может превышать 100м. Пробоотбор ЛТС обычно выполняется на глубину 1-10 м, хотя имеются технические средства для отбора проб грунта на глубину 20-30 м. В практике инженерных изысканий принят выход керна не менее 80%, при поинтервальном контроле проходки выработок. Что подразумевает достаточно высокую точность вертикальной «привязки» и определения границ слоев [3, 7, 8].

Для получения пригодных проб необходимого качества следует использовать соответствующее буровое оборудование и грунтоносы (таблица 2 [3]). Самым приемлемым типом пробоотборника является задавливаемый, так как отбор керна производится из ненарушенной части разреза (опережая собственно бурение) с возможностью отбора проб 1-2 класса применимости для лабораторных испытаний [3, 7, 8, 9]. В международной практике широко используется отбор проб прямо в задавливаемый грунтонос (стакан) с его хранением и транспортировкой в стационарную лабораторию (для минимизации нарушения пробы). В различных грунтах применяют толстостенные и тонкостенные стаканы, с различным углом режущей кромки и при соблюдении требований к чистоте и шероховатости внутренней поверхности [3, 4].

В отечественной практике самым распространенным является отбор проб колонковым снарядом, с применением двойных труб для уменьшения возможного вращения керна.

Таблица 2.								
Грунтоносы скважинного типа[3]								
Тип проботборника	Глубина пенетрации, м	Диаметр керна (внутренний диаметр труб), мм	Применимость в различных морских грунтах					
			текучие-текучепластичные глинистые грунты	мягкопластичные – полутвердые глинистые грунты	полутвердые-твердые глинистые грунты, с обломочным мат-ом	пески рыхлые –средней плотности, супеси и суглинки нормально и слабо уплотненные	плотные пески, сильно переуплотненные суглинки, супеси	малопрочные скальные и полускальные грунты
Поршневой	1 - 2	68 - 119	A - B	A - B	нет	A-B	нет	нет
Задавливаемый тонкостенный	1 - 2	45-70	A	A - B	нет	B-C	C-D	нет
Задавливаемый толстостенный	0,5 - 1	45 - 68	D	C-D	B	B-C	C-D	C-D
Вращательный, колонковая трубка	1 - 4	83 - 119	нет	B - C	A	C-D	C-D	A
Ударно-вибрационный	1 - 4	83 - 119	D	B - C	C - D	A - B	A - C	C-D
Забивной	0,5 - 1	83 – 119	нет	D	B-D	B-C	A - C	B - D

Примечания. 1.Буквами обозначен уровень применимости, где: A = высокий уровень применимости (высоко рекомендуемый), B = средний уровень применимости (рекомендуемый), C = низкий уровень применимости (мало рекомендуемый, в крайнем случае), D = очень низкий уровень применимости (не рекомендуемый, для общей оценки только) и нет = не применим.
2.Глубина пенетрации определяется ниже забоя скважины за один рейс.

Используются также одинарные и тройные колонковые наборы. Колонковые снаряды позволяют опробовать наиболее плотные и прочные отложения (включая слабые скальные грунты, мерзлые породы), наряду с ударно-вибрационными и забивными устройствами.

Результатом морских геотехнических работ являются количественные характеристики физико-механических свойств (нормативные и расчетные параметры), необходимые для проектных рас-

четов осадки, устойчивости оснований; однако эти данные имеют локальный характер, распространение которых по простиранию и глубине осуществляется с использованием геофизических профильных работ.

Геотехническое оборудование для шельфа практически не производится в РФ, как и постройка специализированных судов. Морально и физически устаревшая техническая база является существенным ограничением получения достаточных и достоверных данных для проектирования морских объектов и дальнейшего освоения шельфа.

Литература

1. ГОСТ 20522 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний
2. ГОСТ 25100 Грунты. Классификация
3. ГОСТ Р ИСО 19901-8 Морские исследования грунтов. Проект окончательной редакции.
4. Локтев А.С. Разработка международного стандарта для инженерно-геологических изысканий на шельфе «Исследование морских грунтов». «Инженерные изыскания» 2/2008 – М.: ФГУП ПНИИИС - стр. 58-61
5. Локтев А.С. Современные технологии инженерно-геологических изысканий на шельфе. Статическое зондирование.: Труды 6-ой Межд. конф. по освоению Российского шельфа РАО'03. – Санкт-Петербург, 15-17 сентября 2003. – С.277-282
6. СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения
7. СП 446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ
8. СП 504.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования
9. СП 11-114-2004 Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. Госстрой России. – М.: ФГУП ПНИИИС, 2004. – 88с.
10. Токарев М.Ю., Бирюков Е.А. Применение трехмерной сейсморазведки сверх высокого разрешения для решения инженерно-геологических задач на шельфе. Материалы XV конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в РФ». Москва. 25-29.11.2019

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ГРУНТА ПРИ УСЛОВИИ ЕГО НАСЫЩЕНИЯ КЕРОСИНОМ

Т.В. Любимова

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»,
350040, г.Краснодар, ул.Ставропольская, 149. E-mail: TV-Luy@yandex.ru

В ходе эксплуатации грунтового основания существует вероятность изменения его химического состава за счет антропогенного загрязнения. В связи с этим химические процессы постепенно или в течение короткого времени приводят к физическому изменению структуры грунта и его свойств – диспергирование и агрегирование. Поэтому существует необходимость в оценке связи химического состава грунта и его физико-механических свойств.

Чаще всего в поровом пространстве грунта встречаются углеводороды, которые попадают на земную поверхность при эксплуатации нефтяных месторождений, при переработке нефтепродуктов, нарушения технологических процессов и т.д. Исследованиями изменений физико-механических свойств грунтов при их загрязнении нефтью занимались многие исследователи [1-5], однако большинство вопросов остаются до сих пор не решенными.

В качестве исследуемых грунтов в работе были выбраны грунты, обладающие свойством просадочности – эолово-делювиальные суглинки.

Методика исследования сводилась к изучению процесса деформации грунта при условии его насыщения керосином марки КТ-1. Вязкость, плотность, растворяющая способность и ряд других физико-химических свойств керосина сильно отличаются от свойств воды, которую используют при испытаниях на определение прочности и деформируемости грунта согласно утвержденной методики [6].

Испытания грунтов проводились в условиях компрессионного сжатия, без возможности бокового расширения грунта по схеме двух кривых в условиях природной влажности грунта и его полного насыщения жидкостью [7]. Всего было выполнено 40 парных испытаний. Первые 20 испытаний использовалась вода в качестве поровой жидкости, во вторых 20 испытаниях вода была заменена на керосин.

Лабораторные исследования проводились на базе лаборатории при кафедре нефтяной геологии, гидрогеологии и геотехники Кубанского государственного университета.

Были получены модели развития осадок грунта в виде зависимости давления осадка в природном состоянии, и давления осадка в водонасыщенном состоянии (Рис. 1).

В итоге при насыщении грунта водой были получены следующие показатели. Диапазон начального просадочного давления варьировал от 0,072 МПа до 0,106 МПа. Среднее значение начального просадочного давления – от 0,082 до 0,089 МПа. Относительная просадочность при 0,3 МПа – в диапазоне от 0,026 до 0,060 д.е. Среднее значение изменялось от 0,040 до 0,046 д.е.

При испытании грунтов с насыщением их керосином показатели изменились в следующую сторону. Диапазон начального просадочного давления согласно испытаниям варьировался от 0,132 МПа до 0,168 МПа. Средний значение начального просадочного давления – от 0,140 до 0,150 МПа. Относительная просадочность при 0,3 МПа в диапазоне от 0,023 до 0,043 д.е. Среднее значение изменялось от 0,030 до 0,040 д.е.

В связи с этим наблюдается увеличение начального просадочного давления с 0,026-0,060 до 0,140-0,168 МПа, что является существенным. Относительная просадочность уменьшилась в диапазоне 0,023-0,043 до 0,030-0,040 д.е.

Дальнейшее сравнение изменения показателей просадочности велось на наиболее показательных опытах. В работе приведен пример испытаний образца грунта ск.1 с глубины отбора 2,0 м и 2,6 м и образца ск.2 с глубины отбора 3,1 м (Рис. 2, 3).

Суммарная относительная осадка составила при природной влажности грунта $\varepsilon=0,157$, в состоянии водонасыщения $\varepsilon=0,319$, коэффициент пористости при давлении 0,3 МПа составил 0,633. Во втором случае, суммарная относительная осадка составила при природной влажности грунта $\varepsilon=0,157$, в состоянии насыщения керосином $\varepsilon=0,256$. Таким образом, суммарная относительная

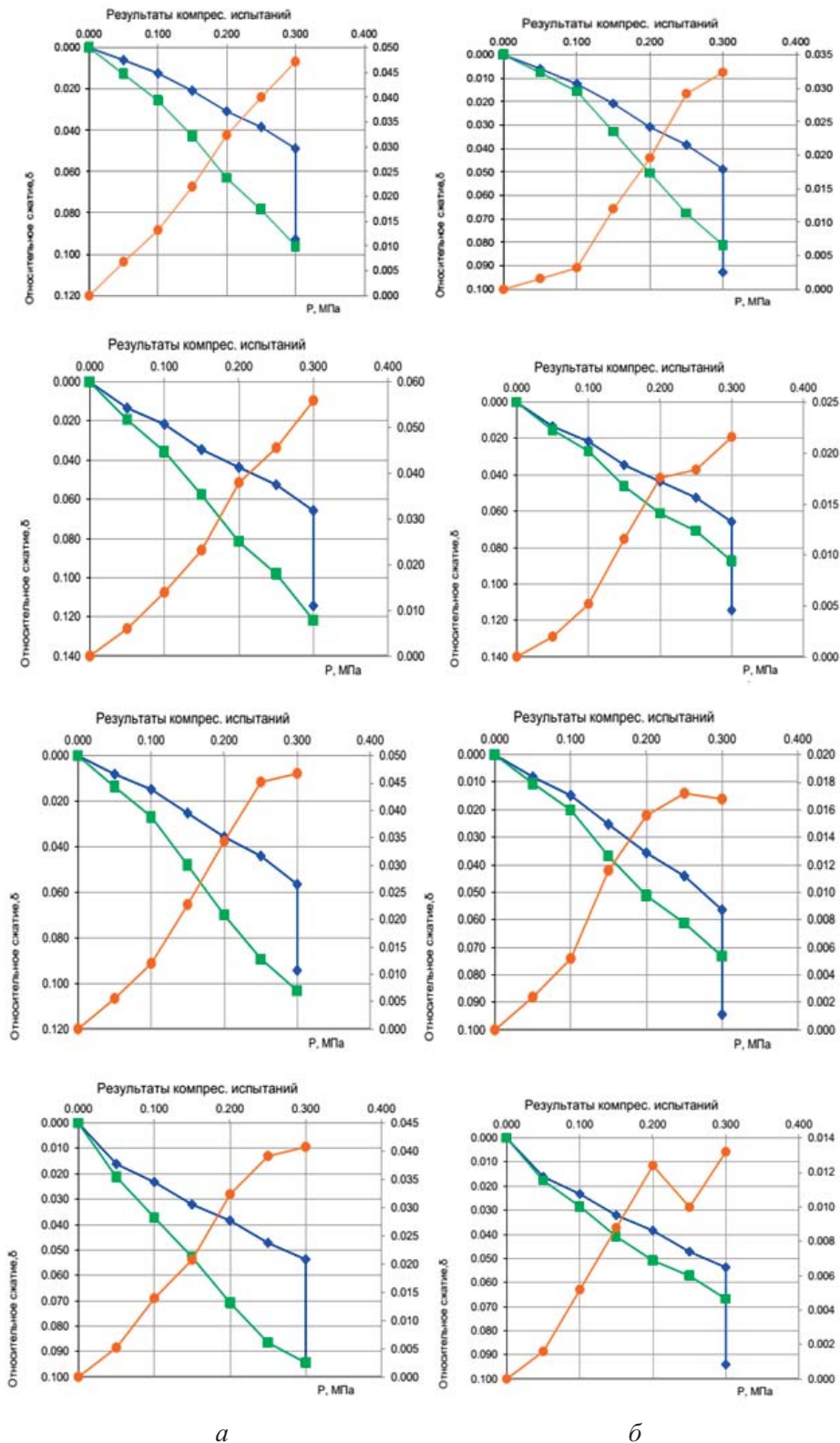
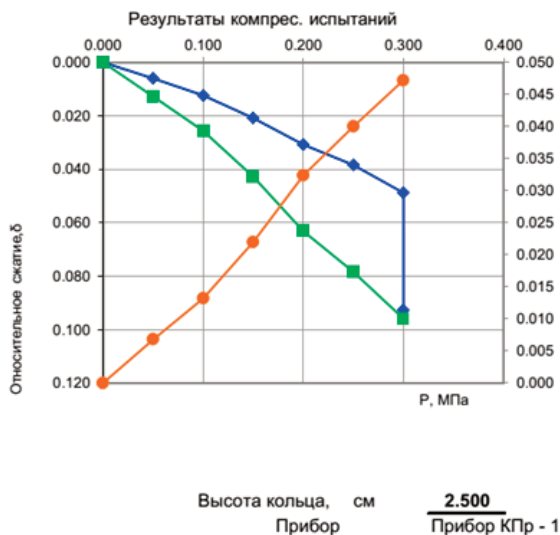


Рис. 1. Модели развития осадок грунта
 а) испытание с водой, б) испытание с керосином КТ-1.

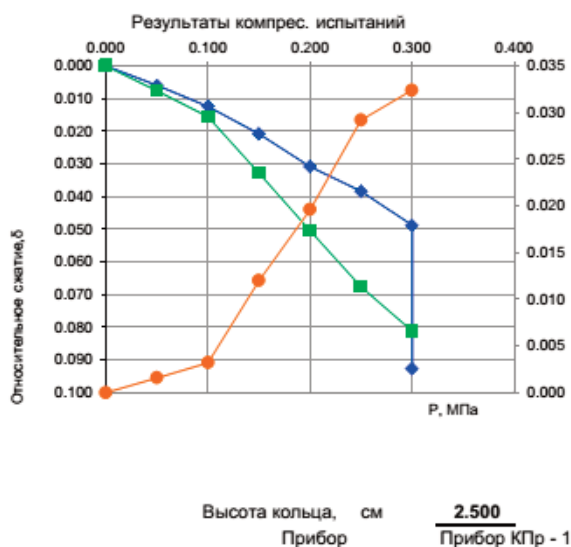
осадка уменьшилась в 1,24 раза. При этом основное уменьшение осадки наблюдается на первых ступенях давления 0,05 МПа, разница в 0,005 д.е., что составляет почти 1,63 раза.

Аналогичным образом были обработаны результаты испытаний образца грунта ск.1 с глубины отбора 2,6 м. Суммарная относительная осадка составила при природной влажности грунта $\epsilon=0,231$, в состоянии водонасыщения $\epsilon=0,413$, коэффициент пористости при давлении 0,3 МПа составил 0,543. Суммарная относительная осадка составила при природной влажности грунта $\epsilon=0,231$, в со-



Ступень давления	Относительное		Коеф. порис.	Коеф. сжим.	коэффициент сжатия
	прир. влажн.	водонас.			
P	ϵ_i	$\epsilon_{i,w}$	e_i	m_D	E_k
первая кривая					
0.000	0.000	0.000	0.800		
0.050	0.006	0.000			
0.100	0.012	0.000	0.778	0.223	4.839
0.150	0.021	0.000			
0.200	0.031	0.000	0.745	0.331	3.261
0.250	0.038	0.000			
0.300	0.049	0.000	0.712	0.324	3.333
0.300	0.000	0.093	0.633		
вторая кривая					
0.000	0.000	0.000	0.800		
0.050	0.000	0.013			
0.100	0.000	0.026	0.754	0.461	2.344
0.150	0.000	0.043			
0.200	0.000	0.063	0.686	0.677	1.596
0.250	0.000	0.078			
0.300	0.000	0.096	0.627	0.590	1.829

Рис. 2. Испытание образца грунта ск.1, глубина отбора 2,0 м (вода).



Ступень давления	Относительное		Коеф. порис.	Коеф. сжим.	коэффициент сжатия
	прир. влажн.	водонас.			
P	ϵ_i	$\epsilon_{i,w}$	e_i	m_D	E_k
первая кривая					
0.000	0.000	0.000	0.800		
0.050	0.006	0.000			
0.100	0.012	0.000	0.778	0.223	4.839
0.150	0.021	0.000			
0.200	0.031	0.000	0.745	0.331	3.261
0.250	0.038	0.000			
0.300	0.049	0.000	0.712	0.324	3.333
0.300	0.000	0.093	0.633		
вторая кривая					
0.000	0.000	0.000	0.800		
0.050	0.000	0.008			
0.100	0.000	0.016	0.772	0.281	3.846
0.150	0.000	0.033			
0.200	0.000	0.050	0.709	0.626	1.724
0.250	0.000	0.068			
0.300	0.000	0.081	0.654	0.554	1.948

Рис. 3. Испытание образца грунта ск.1, глубина отбора 2,0 м (керосин).

стоянии насыщения керосином $\epsilon=0,307$. Суммарная относительная осадка уменьшилась в 1,34 раза. При этом основное уменьшение осадки наблюдается на ступени давления 0,2 МПа, разница в 0,021 д.е., что составляет почти 1,33 раза.

Испытание образца грунта ск.2 с глубины 3,1 м показало, что суммарная относительная осадка составила при природной влажности грунта $\epsilon=0,173$, в состоянии водонасыщения $\epsilon=0,374$, коэффициент пористости при давлении 0,3 МПа составил 0,599. Суммарная относительная осадка составила при природной влажности грунта $\epsilon=0,173$, в состоянии насыщения керосином $\epsilon=0,231$. Суммарная относительная осадка уменьшилась в 1,62 раза. При этом основное уменьшение осадки наблюдается на ступени давления 0,2 МПа, разница в 0,028 д.е., что составляет почти 1,60 раза.

Анализ результатов испытаний дает наглядно увидеть, что при насыщении просадочного грунта керосином вместо воды улучшаются его характеристики деформируемости в 1,5-2 раза. Уменьшается суммарная относительная осадка в 1,3-1,6 раза, увеличивается начальное просадочное давление практически в 2 раза.

Таким образом, параметром, влияющим на показатели деформационных свойств исследуемых просадочных грунтов, является вязкость. Так как кинематическая вязкость керосина при температуре 18°C равна 0,0250 м²/с, а вязкость воды при 15°C равна 0,0114 м²/с, параметры поведения в ходе консолидации у этих двух жидкостей будут различны.

Литература

1. Бракоренко Н.Н., Емельянова Т.Я. Влияние нефтепродуктов на петрографический состав и физико-механические свойства песчано-глинистых грунтов (на примере г. Томска) // Вестник Том. гос. ун-та. – 2011. – № 342. – С. 197–200.
2. Казенников А.П. Исследование физико-механических свойств грунтов, загрязненных нефтепродуктами // Роль мелиорации в обеспечении продовольственной и экологической безопасности России: материалы междунар. науч.-практ. конф. / Моск. гос. ун-т природообустройства. – М., 2009.
3. Копылов Ю.Н. Изменение свойств песчаного и глинистого грунта в результате воздействия моторного масла // Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов: Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2003. – С. 31–33
4. Середин В.В., Ядзинская М.Р. Закономерности формирования прочностных свойств глинистых грунтов, загрязненных углеводородами // Инженерная геология. – 2014. – № 2. – С. 26–33.
5. Ядзинская М.Р., Агеева Т.А. Исследование процессов диспергации и агрегации грунтов при загрязнении их углеводородами // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. – Пермь, 2014. – Т. II. – С. 51–53.
6. ГОСТ 12248.4-2020 Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости
7. ГОСТ 23161-2012 Метод лабораторного определения характеристик просадочности

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ПРОМЕРЗАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ НА МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МОДЕЛЬНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ

И.В. Манухин

МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, г.Москва, Ленинские горы, д.1.
E-mail: il.hrommann@gmail.com

Циклическое промерзание-оттаивание грунтов широко распространенный комплекс процессов на поверхности Земли. Наибольшее значение они имеют в районах распространения сезонномерзлых и сезонноталых грунтов. Под их влиянием дисперсные грунты постоянно изменяются, небольшими инкрементами, поэтому для более эффективного планирования инженерно-хозяйственного освоения территорий необходимо знать и прогнозировать последствия этих процессов.

В циклически промерзающих-оттаивающих грунтах имеют место такие процессы как: морозное измельчение, температурные деформации частиц твердой фазы, агрегация и дезагрегация частиц в результате промерзания.

Процесс морозного измельчения заключается в разрушении частиц грунта вследствие превращения воды в лед, сопровождающегося увеличением объема на 9%. Давление, создаваемое в поровом пространстве, передается на скелет грунта, вследствие чего тот может уплотниться, а часть слагающих его частиц разрушиться, или объем данного грунта увеличится, а сам грунт вспучится. Вода может попадать в дефекты частиц грунта, и давление, возникающее при промерзании воды, может увеличить размеры дефекта или вовсе разрушить частицу.

Температурное выветривание происходит под воздействием суточных и сезонных колебаний температуры, вызывающих неравномерное нагревание и охлаждение грунтов. При этом минеральные зерна, слагающие грунты, испытывают расширение при повышении температуры и сжатие при понижении температуры. Величина коэффициента теплового линейного расширения осадочных, магматических и метаморфических грунтов колеблется в пределах $(0,2-3,4) \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ [4].

Таким образом, в грунтах попеременно возникают сжимающие и растягивающие напряжения. Различные минералы, из которых состоят грунты, обладают неодинаковым коэффициентом объемного расширения, поэтому при изменении температуры они испытывают деформации в различной степени. К тому же коэффициент линейного расширения даже у одного и того же минерала меняется в зависимости от направления в кристалле, что в купе с анизотропностью, приводит к возникновению напряжений на участках контактов частиц и остаточных деформаций. Однако влияние данного фактора существенно для скальных грунтов или обломков пород с жесткими структурными связями (особенно полиминеральных), для дисперсных грунтов оно весьма невелико.

Процессы агрегации и дезагрегации частиц пылеватой и глинистой размерности в циклично промерзающих-оттаивающих грунтах могут иметь место. Процесс агрегации частиц часто исследователями связывается с возникающим давлением при промерзании воды, приводящим к формированию фазовых контактов [10], также данный процесс связан с увеличением солёности порового раствора в областях окружающих центры кристаллизации воды, растворимые соединения «отжимаются» из промерзающей части в незамерзшую [9], увеличивая ее солёность, тем самым снижая толщину ДЭС, что и приводит к агрегации частиц. Процесс же дезагрегации может происходить в результате промерзания водных пленок и возникновении расклинивающего давления, а также при оттаивании грунта, вследствие разбавления незамерзшей засоленной воды – талой водой из льда, тем самым вызывая увеличение величины ДЭС – приводящее к дезагрегации частиц.

Влияние циклического промерзания-оттаивания на состав дисперсных грунтов зачастую оказывается невелико. Так, в водной вытяжке мономинеральных глинистых грунтов наблюдается уменьшение рН и общей щёлочности и увеличение степени засоления, в то время как у полиминеральных глин величина рН и общей щёлочности остается почти без изменений, а содержание почти всех остальных компонентов снижается. В песчаном грунте отмечается уменьшение всех компонентов водной вытяжки. В ионообменном комплексе полиминеральных глин и бентонита сумма катионов после 100 циклов промерзания-оттаивания увеличилась, причем для полиминеральных глин уве-

личение весьма высокое, происходит насыщение обменного комплекса ионами Ca (в основном) и Na, в то время как у каолина сумма катионов уменьшается [7]. Минеральный состав песчаных грунтов, в рамках экспериментальных исследований, изменяется очень слабо; в глинистых же грунтах могут происходить процессы деградации и аморфизации глинистых минералов, а также трансформации минералов группы гидрослюдов в смешаннослойные «слюдо-сметитовые» образования.

Объектами исследования данной работы стали модельные дисперсные грунты: асканглина, синяя кембрийская глина, полиминеральная супесь (aQ_{IV}), мономинеральные образцы – роговая обманка и биотит, мелкие пески калиево-полевошпатовый и кварцевый (люберецкий). Образцы исследовались в своем исходном виде и после 100 циклов промерзания-оттаивания: 12 часов при температуре -20°C и 12 часов при комнатной температуре, в условиях закрытой системы в водонасыщенном состоянии.

Изучение минерального состава грунтов проводилось методом рентгеновской дифрактометрии [6]. Определение гранулометрического состава грунтов проводилось пипеточным методом в соответствии с [2]; подготовка грунта к анализу выполнялась по методике П.Ф. Мельникова; определение микроагрегатного состава грунтов проводилось пипеточным методом, подготовка грунта к анализу состояла в разрушении водонестойких связей и выполнялась по методике Н.А. Качинского [6].

Определение плотности твердых частиц грунтов проводилось пикнометрическим методом с использованием обезвоженного керосина в соответствии с [1]. Влажностные характеристики определялись согласно [1].

Результаты определения минерального состава глинистых образцов представлены в табл. 1, а мономинералов и песчаных образцов в табл. 2.

<i>Таблица 1.</i>			
Изменение минерального состава модельных глинистых образцов			
Минералы и их соотношения	Асканглина	Синяя глина кембрийская	Супесь полиминеральная
	В1/А1	В2/А2	В3/А3
Кварц	0.7/0.3	22.2/21.0	58.9/57.7
Калиевый полевой шпат	4.1/3.7	16.0/15.3	12/11.4
Плагиоклаз	1.8/2.0	6.2/6.0	10/11.1
Доломит	-	-	3.4/1.6
Каолинит	2.3/1.1	6.8/5.1	1.4/3.9
Иллит	6.3/4.8	19.0/18.8	4.6/5.7
Иллит-сметит	-	22.6/26.1	-
Сметит	84.8/88.1	-	9.7/8.6
Хлорит	-	7.2/7.7	-
Сметит, см.сл./иллит	13.46/14.93	1.19/1.39	2.11/1.50
Примечание: В/А – данные минерального состава образцов до (В) и после (А) 100 циклов промораживания-оттаивания.			

В образце асканглин мы наблюдаем увеличение содержания смектита на 3,3%, преимущественно, за счет сокращения доли каолинита и иллита. Схожая тенденция намечается и у образца синей кембрийской глины, где растёт содержание смешаннослойных иллит-сметитовых пакетов на 3,5%. Выделяется из данного ряда образец полиминеральной супеси, в котором растёт содержание иллита и каолинита, а содержание смектита здесь падает.

Образец, представленный, преимущественно, роговой обманкой, в минеральном составе изменился незначительно; при вариациях в содержании примесных минералов количество роговой обманки почти не изменилось.

Минеральный состав образца мономинерального биотита в результате 100 циклов промерзания-оттаивания не изменился. Биотит в реакционном ряду устойчивости минералов к выветриванию Боуэна занимает позицию «более устойчивую», чем роговая обманка [8].

Минеральный состав образцов песков полевошпатового и кварцевого также остался почти без изменений, за исключением небольшого увеличения содержания кварца на 2,5% и 1,2% соответственно и уменьшением содержания калиевого полевого шпата на 1,3 и 1,2% соответственно. Кварц, как известно, относится к наиболее устойчивым к выветриванию минералам. Присутствующие в песках полевые шпаты могли при криогенном циклическом воздействии в небольшом количестве перейти в аморфные гидроксиды алюминия и кремния.

<i>Таблица 2.</i>				
Изменение минерального состава модельных песчаных образцов				
Минералы и их соотношения	Роговая обманка	Биотит	Песок КПШ	Песок кварцевый
	В4/А4	В5/А5	В6/А6	В7/А7
Кварц	0.3/-	-	2.5/5.0	94.7/95.9
Калиевый полевой шпат	3.5/5.2	-	79.9/78.6	3.1/1.9
Плагиоклаз	1.7/1	-	17.6/16.4	2.2/2.2
Биотит	-	100/100	-	-
Роговая обманка	76.0/76.4	-	-	-
Иллит	3.4/4.3	-	-	-
Хлорит	15.1/13.1	-	-	-

Примечание: В/А – данные минерального состава образцов до (В) и после (А) 100 циклов промораживания-оттаивания.

В наиболее дисперсных глинистых грунтах (асканглина, синяя глина) в результате циклического промерзания-оттаивания происходит увеличение дисперсности, которое выражается в небольшом увеличении содержания глинистых частиц, уменьшении среднего диаметра частиц в гранулометрическом и микроагрегатном составах (табл.3). Преобладание агрегатов крупнопылеватого размера сохраняется, отмечается ослабление связей между частицами в микроагрегатах (исключая асканглину), подтверждаемое уменьшением коэффициентов агрегированности.

Для полиминеральной супеси (менее дисперсной) преобладающей фракцией до и после криогенного воздействия остается крупнопылеватая, ее содержание по гранулометрии не меняется. Отмечается некоторое увеличение среднего диаметра частиц за счет уменьшения числа более тонких фракций, возможно, участвующих в формировании новых более крупных агрегатов (в качестве глинистых рубашек), при том, что в микроагрегатах (<0,005 мм) связи между частицами ослабевают, разрушаются цементационные контакты (коэффициенты агрегированности становятся менее 2) (табл.3).

Для песчаных грунтов характерным становится дробление более крупных средне- или мелкопесчаных фракций и, наоборот, увеличение содержания мелко-тонкопесчаного материала, в содержании пылеватоглинистых частиц почти ничего не меняется (табл.4). При этом средние диаметры первичных частиц практически не меняются.

В образце асканглины после циклического промерзания-оттаивания плотность твердых частиц снизилась с 2,36 до 2,31 г/см³ (табл.5) из-за увеличения содержания смектита, «идеальная» плотность которого составляет 2,06-2,20 г/см³ [4] и снижения относительного содержания более плотных глинистых минералов, иллита и каолинита.

В образце синей кембрийской глины плотность твердых частиц упала с 2,92 до 2,85 г/см³ (табл.5), возможно, вследствие увеличения относительного содержания смешаннослойных иллит-смектитовых образований. Возможно, снижение плотности частиц связано с некоторой аморфизацией твердого компонента.

Плотность твердых частиц полиминеральной супеси В3/А3 после 100 циклов промерзания-оттаивания почти не изменилась.

Таблица 3.

Средние диаметры частиц (d_{50}), коэффициенты неоднородности (d_{60}/d_{10}) и агрегированности (K_a) по данным гранулометрического и микроагрегатного составов модельных глинистых грунтов

Образец	d_{50} , мм	d_{60}/d_{10}	$K_a < 0,001$ мм	$K_a < 0,005$ мм
В1/А1 асканглина	-/-	-/-	5,9/6,0	2,1/2,8
	0,013/0,008	-/-		
В2/А2 синяя глина	0,0014/0,0011	-/-	3,1/1,5	2,0/1,1
	0,008/0,0028	-/-		
В3/А3 полиминеральная супесь	0,028/0,031	-/-	3,7/1,8	1,1/2,0
	0,024/0,037	14,5/6		

Примечание: в первой строке у каждого образца в ячейке указывается значение параметра по данным гранулометрического анализа до/после циклического промораживания-оттаивания; во второй строке аналогично выписаны результаты микроагрегатного анализа.

Таблица 4.

Средние диаметры частиц (d_{50}) и коэффициенты неоднородности (d_{60}/d_{10}) по данным гранулометрического состава модельных песчаных грунтов

Образец	d_{50} , мм	d_{60}/d_{10}
В4/А4 Роговая обманка	-/-	~1/~1
В5/А5 Биотит	0,16/0,33	1,55/1,9
В6/А6 Песок КПШ	0,16/0,16	1,65/1,85
В7/А7 Песок кварцевый	0,18/0,18	1,75/1,5

Примечание: В/А – данные гранулометрического состава образцов до (В) и после (А) 100 циклов промораживания-оттаивания.

Таблица 5.

Плотность частиц и влажностные показатели для модельных глинистых грунтов до/после криогенного воздействия

Образец	Название по [3]	Плотность частиц ρ_s , г/см ³	Влажность, %			Число пластичности I_p , ед
			$W_{мвб}$	W_p	W_L	
В1/А1 асканглина	Глина тяжелая	2,36/2,31	55/44	71/64	115/103	44/39
В2/А2 синяя глина	Глина легкая пылеватая	2,92/2,85	21/19	31/34	49/50	18/16
В3/А3 полиминеральная супесь	Супесь пылеватая	2,74/2,73	10/11	16/15	22/21	6/6

Примечания: 1) $W_{мвб}$, W_p , W_L – влажности максимальной молекулярной влагоемкости, нижнего и верхнего пределов пластичности; 2) А2 – суглинок тяжелый пылеватый после воздействия.

Влажностные показатели глинистых образцов претерпели заметные изменения (табл.5). У образца асканглины они уменьшились не менее чем на 7% при том, что в минеральном составе увеличилось содержание смектита и в гранулометрическом составе отмечается повышение дисперсности.

У образца синей кембрийской глины влажностные показатели также снизились, но на меньшую величину (от 1 до 3%), несмотря на повышение содержания глинистых смешаннослойных образований иллит-смектит и небольшое увеличение дисперсности грунта согласно данным гранулометрического анализа.

В образце полиминеральной супеси после 100 циклов промерзания-оттаивания влажностные характеристики почти не изменились, несмотря на небольшое увеличение содержания глинистых минералов.

Плотность твердых частиц после циклического промораживания-оттаивания в образце биотита осталась прежней (3,17 г/см³) и почти не изменилась у роговой обманки (3,33 и 3,32 г/см³ до и после воздействия).

В песчаных образцах после ста циклов промерзания-оттаивания плотность твердых частиц снизилась: у калиево-полевошпатового песка с 2,62 до 2,56 г/см³, а у кварцевого песка с 2,68 до 2,63 г/см³. Изменение плотности твердого компонента, скорее всего, обусловлено частичной аморфизацией минерального вещества.

Заключение

В результате лабораторного эксперимента после 100 циклов промерзания-оттаивания в закрытой системе получено, что минеральный состав модельных и природных грунтов может претерпевать изменения. Проявляются они, в основном, в глинистых грунтах и выражаются в увеличении доли глинистых минералов, преимущественно смектита и иллит-смектита.

В строении исследованных образцов глинистых грунтов, по данным гранулометрического и микроагрегатного анализов, происходят следующие изменения: возрастает дисперсность, что выражается в небольшом увеличении содержания глинистых частиц, уменьшении среднего диаметра частиц в гранулометрическом и микроагрегатном составах, за исключением образца полиминеральной супеси, в котором преобладающей фракцией является крупнопылеватая, считающаяся устойчивой к криогенному воздействию [5]. Отмечается ослабление связей между частицами в микроагрегатах (исключая асканглину), подтверждаемое уменьшением коэффициентов агрегированности. В гранулометрическом составе песчаных модельных грунтов содержание глинистых и пылеватых частиц почти не изменяется, а в песчаных фракциях, как правило, происходит дезинтеграция более крупных по размеру частиц.

Изменения состава и дисперсности отражаются на свойствах модельных грунтов. Плотность твердых частиц в асканглине и синей кембрийской глине снижается, как и характеристические влажности, в то время как в полиминеральной супеси изменения сравнимы с точностью определения используемых методов. Плотность твердых частиц в мономинеральных образцах роговой обманки и биотита практически не изменилась, а в калиевом полевошпатовом и кварцевом песках снизилась, вероятно, за счет частичной аморфизации минерального вещества.

Лабораторные эксперименты, проходящие в реальном времени, далеки от происходящих в природе в геологическом времени процессов, однако, способствуют их лучшему пониманию.

Автор благодарен В.В. Крупской и С.В. Закусину за возможность использовать данные рентгеноструктурного анализа. Работы выполнены с использованием рентгеновского дифрактометра ULTIMA-IV, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета имени М.В. Ломоносова.

Литература

1. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
2. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
3. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация.
4. Грунтоведение / Под ред. В.Т.Трофимова. М.: Изд-во МГУ, Наука, 2005. 1024 с.
5. Конищев В.Н. Лессовые породы: новые возможности изучения их генезиса// Инженерная геология. 2015. № 5. С. 22-36.

6. *Лабораторные работы по грунтоведению / Под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. изд. 3-е испр. и доп. М.: КДУ, 2017. 654 с.*
7. *Микростроение мерзлых пород / Под ред. Э.Д. Еришова. М.: Изд-во МГУ, 1988. 183 с.*
8. *Оллиер К. Выветривание. Пер. с англ. С.С. Чекина, В.С. Знаменского / Под ред. В.П. Петрова. М.: Недра, 1987. 346 с.*
9. *YuxinWu, Seiji Nakagawa, Timothy J. Kneafsey, Baptiste Dafflon, Susan Hubbard. Electrical and seismic response of saline permafrost soil during freeze - Thaw transition // Journal of Applied Geophysics/ 2017, 146/ P. 16-26.*
10. *ZHANG Ze, MA Wei, FENG Wenjie, XIAO Donghui, HOU Xin. Reconstruction of soil particle composition during freeze-thaw cycling: A review // Pedosphere/ 2016, 26 (2)/ P. 167–179.*

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ ГРАФИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЕДУПЛОТНЕНИЯ

В.В. Матвеев^{1,2}, В.В. Шанина²

¹ Geotechnical Graduate Lab, г.Москва, E-mail: v.matveev@geogradlab.ru

² МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, г.Москва, Ленинские горы, д.1.

Введение

В настоящее время вопрос определения параметров переуплотнения грунта является весьма актуальным. Неточности в определении этих параметров влияют на точность определения напряженно-деформированного состояния.

Напряжение предуплотнения σ_c – условное максимальное эффективное напряжение на грунт за время его существования [3]. Таким образом это предельное напряжение, отделяющее «упругое» поведение грунта от «пластичного» [24]. Оценка напряжения предуплотнения σ_c обычно проводится на основе результатов компрессионных испытаний.

За последние 85 лет предложено множество различных графических методов интерпретации напряжения предуплотнения [4, 6]. Однако методы интерпретации, предложенные различными исследователями, могут давать существенно отличные друг от друга результаты [15, 17, 24].

Методы, рассматриваемые в данном исследовании, опираются на зависимость характера деформирования от приложенных напряжений. Их можно поделить на три группы по принципу используемого пространства для графических построений: полулогарифмические, билוגарифмические и энергетические. Краткая характеристика методов с принципами их работы представлена в табл. 1, а их графические построения на Рис. 1.

Систематизация факторов. В процессе исследования [7, 17] были выявлены различные факторы, которые приводят к неоднозначностям при графических построениях, что влияет на точность интерпретации напряжения предуплотнения. При этом выделяются две группы факторов – объективные, то есть не зависящие от оператора, проводящего графические построения, и субъективные – предполагающие любую мыслительную деятельность оператора относительно проведения графических построений (определение точек и отрезков, проведение линий, касательных и секущих, их пересечения), предварительной оценки результата и установления необходимости повторить построения.

Объективные факторы, влияющие на точность графических построений, проявляются на этапе пробоотбора, транспортировки, хранения образцов, в процессе испытания, а также последующей обработки результатов. В табл. 2 показано, как воздействующие меры объективных факторов влияют на точность построений.

Качество образцов существенно влияет на достоверность результатов испытаний. В случае образцов неудовлетворительной сохранности перегиб на компрессионной кривой от переуплотненного к нормально уплотненному состоянию грунта становится округлым и плавным, что затрудняет интерпретацию результатов. Для обеспечения высокого качества образцов следует использовать способы бурения, позволяющие отбирать монолиты, не нарушая их структуры, а также бережно их хранить и транспортировать, в соответствии с действующими стандартами [1].

Процедура реконсолидации является важным этапом испытания грунтов, позволяя привести образец в состояние близкое к его природному и также частично компенсировать нарушение его структуры при пробоотборе и пробоподготовке.

Количество ступеней и их величина при статическом режиме нагружения. Для всех графических методов точность построений напрямую зависит от количества экспериментальных точек, а точность определения напряжения предуплотнения напрямую зависит от плотности точек на участке предполагаемого напряжения предуплотнения. Коэффициент приращения ступеней $LIR = \Delta\sigma/\sigma$ должен быть небольшим, чтобы не разрушать структуру грунта [14] и упростить графические построения. Также можно использовать кинематический режим нагружения с заданной скоростью деформирования (метод CRS) [5].

Краткая характеристика методов определения σ_c и принципы их построений

Метод	Принцип метода
Группа полулогарифмических методов	
Казагранде	Построения проводятся в пространстве коэффициента пористости и логарифма напряжений $e - \log \sigma$ (Рис. 1а). К точке максимальной кривизны компрессионной кривой проводится касательная и горизонтальная линия. Далее, между ними проводится биссектриса. Точка пересечения биссектрисы и касательной к конечному участку определяет напряжение предуплотнения σ_c [12]. Этот метод стандартизован в ГОСТ Р 58326—2018 [2].
Пашеко Силвы	Пространство построений $e - \log \sigma$ (Рис. 1б). Построения состоят в проведении горизонтальной линии через начальный коэффициент пористости e_0 до пересечения с касательной к конечному участку. Далее из точки пересечения опускается вертикальная линия до пересечения с компрессионной кривой, после этого проводится ещё одна горизонтальная линия, пересечение которой с касательной к конечному участку определяет напряжение предуплотнения σ_c [20].
Бэрланда	Построения проводятся в пространстве индекса пористости и логарифма напряжений $I_V - \log \sigma$ (Рис. 1в), которое эквивалентно пространству $e - \log \sigma$. Напряжение предуплотнения σ_c определяется пересечением касательных к начальному и конечному участкам компрессионной кривой [11].
Буна	Пространство построений $e - \log \sigma$ (Рис. 1г). Этот метод использует петлю разгрузки. Напряжение предуплотнения определяется пересечением касательной к конечному участку и линией, параллельной петле разгрузки, проходящей через точку бытового давления [9].
Группа билогарифмических методов	
Баттерфилда, Оикавы, Шридарана, Оницуки	Билогарифмические методы были предложены многими исследователями [10, 18, 19, 22]. Эти методы используют билогарифмическое пространство для зависимости $e+1$ от напряжения σ (Рис. 1д). Отличие методов в выборе основания логарифма. Методы предлагают одни и те же конструкции, которые не зависят от масштаба осей. (Поскольку методы различаются только масштабом осей, их точность одинакова. В данном исследовании эти методы будут рассматриваться как один метод).
Группа энергетических методов	
Тавенаса, Беккера	Используется удельная работа (энергия) деформации как критерий определения напряжения предуплотнения. Построения проводятся в билинейном пространстве зависимости накопленной энергии деформации W от эффективного напряжения σ . Напряжение предуплотнения σ_c определяется простым пересечением касательных к начальному и конечному участку (Рис. 1е) [8, 23]. Этот метод стандартизован в ГОСТ Р 58326—2018 [2].
Нагараджа и Шринивасы	Похож на метод Беккера, отличие в использовании пространства $\log W - \log \sigma$ (Рис. 1ж) [16].
Шенола и Саламера	Похож на метод Беккера, отличие в использовании пространства $W - \log \sigma$ (Рис. 1и) [21].
Вана и Фроста	Похож на метод Беккера, но использует петлю разгрузки при построениях. Для получения линии рассеянной энергии деформации из линии первичного сжатия графически вычитается линия декомпрессии, как показано на Рис. 1к [26].

Регулярность приращения ступеней. Коэффициент приращения ступеней LIR должен быть постоянным во время испытания. Если, например, ступени возрастают на фиксированную величину, то это приводит к учащению точек в области больших напряжений, и, как следствие, к искажению компрессионной кривой в этой области. В результате наблюдается обратный изгиб компрессионной кривой, что не позволяет достоверно определить линию первичного сжатия [14].

Критерием стабилизации для водонасыщенных грунтов является завершение фильтрационной консолидации, которое определяется либо графическими методами Тейлора или Казагранде [2], либо по рассеиванию избыточного порового давления в образце. Если в схеме испытания принят критерий условной стабилизации по времени и (или) деформации, то это может привести к дополнительным деформациям вследствие объемной ползучести, а компрессионная кривая будет искажена [24].

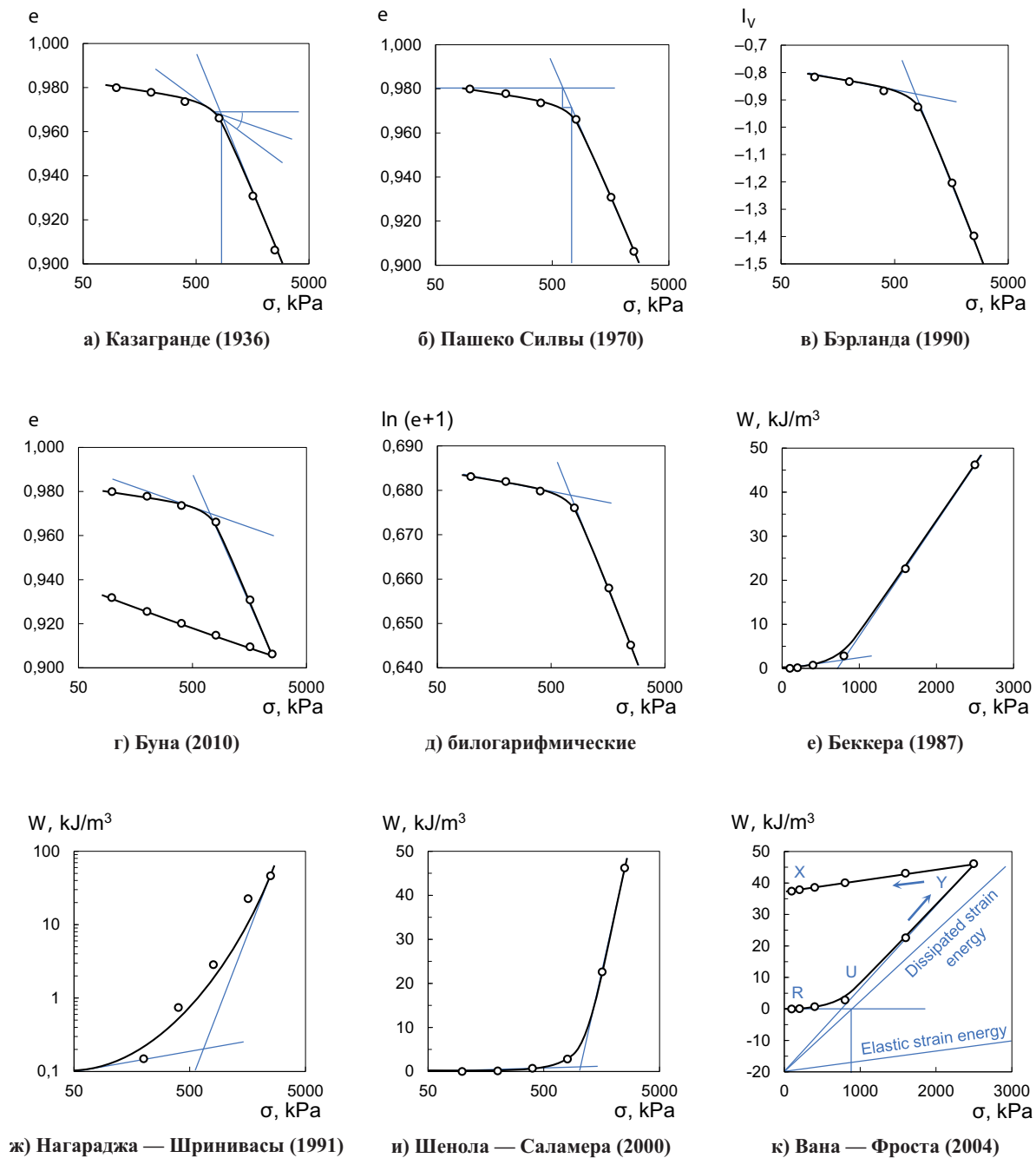


Рис. 1. Графические построения методов определения σ_c .

Максимальное напряжение очевидно должно быть больше предполагаемого напряжения уплотнения σ_c , причем на столько, чтобы гарантировать выход на линию первичного сжатия NCL. Однако стоит принять во внимание, что линейный закон сжимаемости имеет свои ограничения. При больших напряжениях наблюдаются большие относительные деформации и некоторые допущения, принятые для малых деформаций, могут оказывать влияние на результат. В таком случае предпочтительно выбирать методы, использующие естественные деформации, например билогарифмические.

Метод осреднения. Метод Казагранде неустойчив к изменению пропорций масштабов осей, поскольку в построениях используется биссектриса, которая не сохраняет свои свойства при таких трансформациях. Проведение биссектрисы является способом осреднения угла наклона горизонтальной прямой и касательной к точке с наименьшим радиусом кривизны [7]. Использование биссектрисы в пространстве величин различных размерностей сомнительно, в виду того, что необходимо устанавливать коэффициент пропорциональности между ними [13]. В качестве улуч-

Таблица 2.

Влияние объективных факторов на точность графических построений

Этап исследований	Объективные факторы	Воздействующие меры факторов	
		повышение точности	снижение точности
Пробоотбор	Качество образцов	Высокое	Низкое
Испытания	Процедура реконсолидации	Наличие	Отсутствие
	Количество ступеней и их величина	Коэффициент LIR намного меньше единицы ($LIR < 1$), либо кинематический режим (CRS)	Коэффициент приращения ступеней LIR больше единицы
	Регулярность приращения ступеней	Во время испытания коэффициент приращения ступеней LIR не изменяется	Коэффициент LIR непостоянный, например, когда разница между ступенями одинаковая
	Критерий стабилизации	Окончание фильтрационной консолидации	По времени. Проявление эффекта объемной ползучести
	Максимальное напряжение	Намного больше предполагаемого напряжения предуплотнения	Сопоставимо или лишь ненамного больше напряжения предуплотнения
Графические построения	Метод осреднения линий	Медиана	Биссектриса
	Метод сглаживания	Аппроксимация	Интерполяция
	Определение точек	Аналитическое дифференцирование	Графическое дифференцирование
	Определение отрезков	Метод наименьших квадратов	Проведение секущих

шения этого построения нами предлагается использовать медиану, в таком случае точка пересечения не будет зависеть от выбранного масштаба оси.

Метод сглаживания экспериментальных точек. Графические построения, особенно в методах Казагранде и Пашеко Силвы, требуют гладкой непрерывной линии. Интерполяция, как линейная, так и кубическая, не дает существенных преимуществ. Аппроксимация компрессионной кривой на данном участке аналитической функцией является наиболее подходящим решением. В энергетических методах переход от деформации к энергии деформации путем прямого интегрирования, а не методом трапеции, также повышает точность построений [17].

Определение точек максимальной кривизны и точек для целей проведения касательных способом дифференцирования может осуществляться как графически (визуально), так и аналитически (при аппроксимации экспериментальной компрессионной кривой).

Определение отрезков. Самым простым способом является проведение секущей, соединяющей две крайние точки отрезка. Однако при таком подходе не учитываются возможные случайные отклонения крайних точек и совершенно игнорируются точки внутри отрезка. Более приемлемым способом обработки отрезка является метод наименьших квадратов.

Субъективные факторы. Оператор для графических построений субъективно выбирает для проведения касательных отрезки и точки, наиболее представительные на его взгляд. Собственно, проведение касательной и является субъективным фактором. Различные методы используют разный набор касательных для своих графических построений (табл.3).

В таблице 4 показана связь объективных и субъективных факторов.

Только одна касательная используется в методе Пашеко Силвы, соответственно, этот метод наименее подвержен влиянию субъективных факторов [13], однако из этого не следует высокая точность, как это было показано в работах [17] и [24].

Касательная к начальному участку используется во всех рассмотренных методах, кроме оригинального метода Казагранде, метода Пашеко Силвы, и методов, в которых касательная проводится

к ветви разгрузки. Начальный участок компрессионной кривой соответствует рекомпрессии грунта и отражает его упругое поведение.

Часто при определении касательной к начальному участку возникают сложности. На слабо переуплотненных грунтах этот участок короткий и слабо выражен. В случае образцов неудовлетворительной сохранности изгиб между линией рекомпрессии и линией первичного сжатия NCL получается округлым и плавным. Однако изгиб нелегко обнаружить даже в высококачественных образцах, потому что линия декомпрессии является частью петли гистерезиса. При испытании образцов настоятельно рекомендуется проводить процедуру реконсолидации.

В качестве стартовой точки начального участка рекомендуется выбирать точку бытового давления. Включать в начальный участок напряжения, меньше бытового давления не рекомендуется, это приводит к заниженному значению σ_c и завышению индекса рекомпрессии C_r .

Касательную можно получить либо аналитически, дифференцируя функцию, аппроксимирующую компрессионную кривую, в стартовой точке, либо обработав методом наименьших квадратов отрезок компрессионной кривой, соответствующий начальному участку. Для этого необходимо выбрать конечную точку начального интервала. При выборе конечной точки желательно придерживаться наилучшего приближения к экспериментальной кривой, принимая во внимание, что наклон линии рекомпрессии отличается, как правило, в 3-8 раз от наклона линии первичного сжатия NCL [25]. Выбор излишне широкого интервала приводит к завышенному значению σ_c и заниженному индексу рекомпрессии C_r .

Таблица 3.									
Субъективные факторы при графических построениях									
Субъективный фактор (касательная)	Методы								
	Полулогарифмические				Билогарифмические	Энергетические			
	Казагранде	Пашеко Силвы	Бэрланда	Буна		Беккера, Тавенаса	Нагараджа — Шринивасы	Шенюла — Саламера	Вана — Фроста
к начальному участку	• ¹	—	•	—	•	•	•	•	—
к точке макс. кривизны	• ²	—	—	—	—	—	—	—	—
к ветви разгрузки	—	—	—	•	—	—	—	—	•
к конечному участку	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Примечания: ¹ по ГОСТ Р 58326-2018, приложение Г [3] ² в работе Casagrande (1936) [12]									

Касательная к точке максимальной кривизны используется только в оригинальном методе Казагранде. При определении точки максимальной кривизны возникают значительные трудности. В работе [12] Казагранде предлагал выбирать точку с наименьшим радиусом кривизны компрессионной кривой. Следует отметить, в приложении «Г» ГОСТ Р 58326-2018 [3] предлагается модификация этого метода, упрощающая выбор точки наибольшей кривизны, при этом проводится касательная к начальному участку, а выбор точки кривизны уже не зависит от оператора.

Неправильный выбор точки максимальной кривизны, а также некорректное проведение касательной может приводить как к завышению, так и к занижению напряжения преуплотнения σ_c .

При аппроксимации компрессионной кривой аналитической функцией поиск точки максимальной кривизны становится тривиальной задачей.

Касательная к ветви разгрузки используется при графических построениях в методах Вана-Фроста и Буна вместо касательной к начальному участку. Ветвь разгрузки соответствует декомпрессии грунта и отражает упругое его поведение. Качество образцов практически не сказывается на характере разгрузки, что является несомненным преимуществом ее использования [9]. Также использование касательной к ветви разгрузки рекомендуется для слабо переуплотненных грунтов.

Линии декомпрессии и рекомпрессии образуют петлю гистерезиса и имеют нелинейный характер, причем линия декомпрессии вогнутая, а линия рекомпрессии выпуклая. Касательная к ветви разгрузки не должна проводиться только к начальной части ветви, поскольку в этом месте ветвь разгрузки практически горизонтальна, что ведет к переоценке индекса декомпрессии C_s и недооценке σ_c . Также следует избегать проведения касательной к конечному участку ветви разгрузки, это может привести к обратной ситуации, C_s будет недооценен, а σ_c переоценен.

Таблица 4.					
Связь объективных и субъективных факторов					
Этап исследования	Объективный фактор	Субъективный фактор			
		НУ	ТК	ВР	КУ
Пробоотбор	Качество образцов	•	•	—	•
Проведение испытаний	Процедура реконсолидации	•	•	—	—
	Количество ступеней и их величина	•	•	•	•
	Регулярность приращения ступеней	—	—	—	•
	Критерий стабилизации	•	•	—	•
	Максимальное напряжение	—	—	—	•
Графические построения	Метод осреднения линий	—	—	—	—
	Метод сглаживания кривой	•	•	•	—
	Определение точек	—	•	—	—
	Определение отрезков	•	—	•	•
Примечание: НУ – касательная к начальному участку, ТК – к точке максимальной кривизны, ВР – к ветви разгрузки, КУ – к конечному участку.					

Для обработки касательной к ветви разгрузки следует использовать метод наименьших квадратов, примененный к наиболее представительному участку ветви разгрузки. Выбирать весь интервал разгрузки не рекомендуется, это может привести к завышению значения напряжения предуплотнения σ_c и занижению индекса декомпрессии C_s . В качестве первого приближения, можно воспользоваться эмпирической закономерностью, полагающей, что линии декомпрессии и рекомпрессии в 3-8 раз более пологие, чем линия первичного сжатия NCL [25]. По-видимому, оптимальной длиной такого участка является величина логарифма предполагаемого коэффициента переуплотнения OCR . Для графического построения мы рекомендуем провести через точку бытового давления линию, параллельную к касательной к конечному участку, при этом отсекаемый участок ветви разгрузки и будет искомым. Далее обработка выполняется методом наименьших квадратов.

Основными факторами, оказывающими влияние на проведение касательной к ветви разгрузки, являются: величина ступеней, метод сглаживания, а также выбор представительного участка (табл.4).

Касательная к конечному участку используется во всех графических методах. Конечный участок компрессионной кривой отвечает первичному сжатию. При первичном сжатии в грунте преобладают пластичные деформации.

Чтобы правильно провести касательную к конечному участку, необходимо надежно перейти на линию первичного сжатия NCL. Для достоверного выхода на линию первичного сжатия NCL максимальная нагрузка должна быть в несколько раз выше ожидаемого напряжения предварительного уплотнения, что для сильно переуплотненных грунтов может оказаться недостижимым в силу технических ограничений испытательной установки. В случае неполного выхода на линию первичного сжатия NCL напряжение предуплотнения окажется недооцененным, а индекс компрессии C_c завышен.

Следует отметить, что иногда при высоких напряжениях наблюдается обратный изгиб графика. Это может указывать на то, что линейный закон деформируемости выходит за пределы применимости. Кроме того, аналогичный эффект может наблюдаться, когда коэффициент приращения ступеней LIR не является константой в схеме испытания и уменьшается с увеличением эффективного напряжения. В таких случаях касательную к конечному участку следует проводить в самой крутой его части, в противном случае это приведет к недооценке напряжения предуплотнения и переоценке индекса компрессии C_c .

Касательную к конечному участку следует определять методом наименьших квадратов на наиболее представительном участке.

Среди объективных факторов, оказывающих влияние на проведение касательной к конечному участку, также выделяются низкое качество образцов, разрушение образца в процессе испытания из-за слишком большого коэффициента приращения ступеней LIR , а также неверный выбор критерия стабилизации (табл.4).

Заключение

Выявлены некоторые недостатки графических методов определения напряжения предуплотнения σ_c , а также выявлены и систематизированы объективные и субъективные факторы, оказывающие влияние на точность этих графических построений.

Представленная систематизация объективных и субъективных факторов, поможет оценить влияние этих факторов и их вклад в общую погрешность определения напряжения предуплотнения, а также упростит выбор наиболее подходящих методов определения напряжения предуплотнения.

Литература

1. ГОСТ 12071-2014 Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов
2. ГОСТ 12248.4-2020 Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия.
3. ГОСТ Р 58326-2018 Грунты. Метод лабораторного определения параметров переуплотнения.
4. Крамаренко В., Никитенков А. О структурной прочности глинистых грунтов территории Томской области // Известия ТГУ. 2014. С. 1–16.
5. Мельников Р.В., Попков А.А. Применение метода Беккера для определения давления предварительного уплотнения при кинематическом режиме компрессионного испытания // Геотехника. 2016. № 6. С. 54–59.
6. Методы определения параметров переуплотнения грунтов и их практическое применение в условиях Санкт-Петербурга / А.Н. Труфанов, О.А. Шулятьев, А.В. Ростовцев, Г.У. Габсаямов // Инженерные изыскания. 2014. № 11. С. 32–39.
7. Оценка точности различных методов определения напряжения предуплотнения (на примере глинистых грунтов г. Москвы) / В. В. Матвеев, Е. А. Фадеев, М. О. Шевцов, В. В. Шанина // Полевые и лабораторные методы исследования грунтов - проблемы и решения: Материалы Общероссийской научно-практической конференции и выставки, Москва, 21 мая 2021 года. – Москва: Геомаркетинг, 2021. – С. 124-132.
8. Becker D.E., Crooks J.H.A., Been K., Jefferies M.G. (1987) Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 24. No. 4. P. 549–564.
9. Boone S.J. (2010) A critical reappraisal of “preconsolidation pressure” interpretations using the oedometer test. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 47. No. 3. P. 281–296. <https://doi.org/10.1139/T09-093>.
10. Butterfield R. (1979) A natural compression law for soils (an advance on $e - \log p'$). *Géotechnique*, 24(4): 469-480.
11. Burland J.B. (1990) On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, 40(3), 329-378.
12. Casagrande A. (1936) The determination of the preconsolidation load and its practical significance. *Proceedings of the 1st International Conference on soil mechanics and foundation engineering*. Cambridge, UK: Harvard Printing Office, Vol. 3. P. 60–64.
13. Clementino R.V. (2005) Discussion of “An oedometer test study on the preconsolidation stress of glaciomarine clays.” *Canadian Geotechnical Journal*, 42(3), 972–974. doi:10.1139/t05-010

14. Crawford C.B. (1964) *Interpretation of the consolidation test. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 90(5): 87–102.
15. Grozic J.L., Lunne T., & Pande S. (2003) *An oedometer test study on the preconsolidation stress of glaciomarine clays. Canadian Geotechnical Journal*, 40(5), 857–872. doi:10.1139/t03-043
16. Nagaraj T.S., Shrinivasa Murthy B.R., Vatsala A. (1991) *Prediction of soil behaviors – part II – saturated uncemented soil. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 21. No. 1. P. 137-163.*
17. Matveev V.V., Shanina V.V. *The influence of subjective factors on the accuracy of graphical constructions to interpret the preconsolidation pressure in IL-tests Proceedings of 3rd European Regional Conference of IAEG / Athens / Greece / 6-10 October 2021. — Vol. 2. — National Group of Greece of IAEG Athens, Greece, 2021. — Pp. 10–17.*
18. Onitsuka K., Hong Z., Hara Y., & Yoshitake S. (1995) *Interpretation of Oedometer Test Data for Natural Clays. Soils and foundations*, 35(3), 61–70. doi:10.3208/sandf.35.61
19. Oikawa H. (1987) *Compression curve of soft soils. Journal of the Japanese Geotechnical Society, Soils and Foundations. Vol. 27. No. 3. P. 99–104.*
20. Pacheco Silva F. (1970) *A new graphical construction for determination of the preconsolidation stress of a soil sample. Proceedings of the 4th Brazilian Conference on soil mechanics and foundation engineering. Rio de Janeiro, Brazil. Vol. 2. No. 1. P. 225–232.*
21. Senol A., Saglamer A. (2000) *Determination of Preconsolidation Pressure with a New Strain Energy-Log Stress Method. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 5.*
22. Sridharan A., Abraham B. M., and Jose B.T. (1991) *Improved technique for estimation of preconsolidation pressure. Géotechnique. Vol. 41. No. 2. P. 263–268.*
23. Tavenas F., Des Rosier J.P., Leroueil S. et al. (1979) *The use of strain energy as a yield and creep criterion for lightly overconsolidated clays. Géotechnique. Vol. 29. P. 285–303.*
24. Umar M., Sadrekarimi A. (2016) *Accuracy of determining pre-consolidation pressure from laboratory tests. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 54. No. 3. P. 441–450. https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0203.*
25. Verbrugge, J.C. and Ch. Schroeder. «*Geotechnical Correlations for Soils and Rocks.*» (2018).
26. Wang L., Frost J.D. (2004) *Dissipated strain energy method for determining preconsolidation pressure. Canadian Geotechnical Journal. 2004. Vol. 41. No. 4. P. 760–768. https://doi.org/10.1139/t04-013.*

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРИ КАРТИРОВАНИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДАМИ

А.А. Матюшенко, А.А. Иванов, А.И. Посеренин

Российский государственный геологоразведочный университет им.С.Орджоникидзе,
117997, г.Москва, ул.Миклухо-Маклая, д.23. E-mail: anyamatyshenko@rambler.ru

Введение

В настоящее время одной из глобальных экологических проблем является загрязнение окружающей среды нефтью и нефтепродуктами. На всех стадиях добычи и переработки нефти отмечается негативное воздействие углеводородов на почвенные экосистемы, атмосферный воздух, поверхностные и подземные воды.

При попадании нефти и нефтепродуктов в почву происходят глубокие и чаще всего необратимые изменения физических, физико-химических, морфологических, микробиологических свойств, а иногда и существенная перестройка почвенного профиля, что приводит к потере плодородия и отторжению загрязненных территорий из хозяйственного использования [2].

Попадая в почву, токсичные компоненты нефти могут превращаться в еще более токсичные соединения, адсорбироваться, концентрироваться и вовлекаться в трофические цепи, по которым возможно поступление токсикантов в организм человека.

Важной задачей является оперативная оценка нефтяного загрязнения геологической среды, чтобы загрязнение не начало распространяться дальше. Это можно осуществить с помощью геофизических методов. В процессе работ можно оконтурить зону загрязнения в плане, оценить мощность и глубину нефтяного пятна и, таким образом, выполнить первую экспертную оценку для постановки дальнейших более детальных геохимических исследований [6].

Основными задачами геофизических методов являются: изучение литологического строения разреза с выделением проницаемых пород и водоупоров, определение уровня грунтовых вод, скорости и направления их движения и динамики изменения уровня грунтовых вод и т.д. [5].

Можно выделить несколько геофизических методов, позволяющих решать эти задачи: электроразведка методом сопротивлений, георадиолокация сейсморазведка на отраженных и преломленных волнах.

Применение комплекса различных геофизических методов, основанных на закономерностях изменения разных физических параметров, позволяет оценить глубину и мощность зоны загрязнения, ее площадное распространение, выявить и проследить глинистые слои и уровни грунтовых вод [4].

Для загрязненных грунтов, подвергшихся биодеградаци, характерны аномально низкие значения удельных электрических сопротивлений. Скорость изменения (уменьшения) удельных электрических сопротивлений зависит от количества микроорганизмов в грунтах.

Характер изменения удельных электрических сопротивлений в процессе биодеградаци является устойчивым поисковым признаком зон загрязнений углеводородами, поэтому наибольшей эффективностью при изучении загрязнения грунтов обладает электроразведка методом сопротивлений в модификации электротомографии [8]. Комплекс методов электропрофилирования и электротомографии позволяет эффективно картировать и изучать зоны загрязнения углеводородами.

Методика

Были проведены экспериментальные работы с целью изучения характера изменения удельных электрических сопротивлений грунтов, загрязненных нефтепродуктами для оценки возможности применения методов электроразведки для картирования загрязненных грунтов.

Для этих целей была собрана лабораторная установка, которая состояла из трех пластиковых емкостей с прикрепленными к ним электродами. Объем каждой емкости составлял около 3 литров. Схема емкости представлена на Рис. 1.

Каждая емкость заполнялась грунтом. Для целей эксперимента были выбраны три типа грунта. Это влажные супесчаные грунты, супесчаные грунты с добавлением торфа и дерново-подзолистые

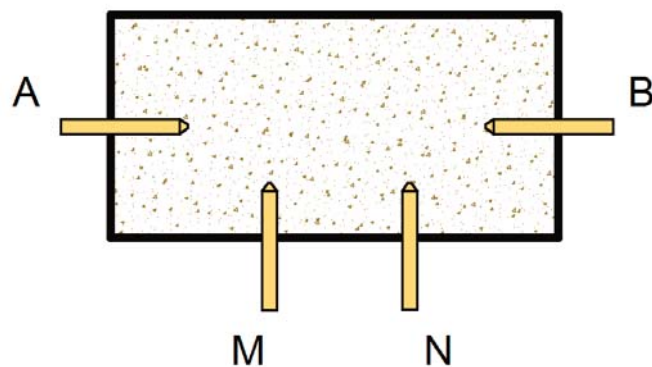


Рис. 1. Установка для измерения удельного электрического сопротивления.

почвы. Выбор разного типа грунта связан с изучением характера и скорости биodeградации загрязнения и связанного с этим процессом изменения удельного электрического сопротивления.

В эксперименте использовалась аппаратура ЭРП-1 (Рис. 2). Через питающие электроды А и В подавался стабилизированный ток, составляющий 5 мА. Через приемные электроды М и N осуществлялось измерение разности потенциалов, величина которой пропорциональна значению удельного электрического сопротивления грунта, заполняющего емкость [1].

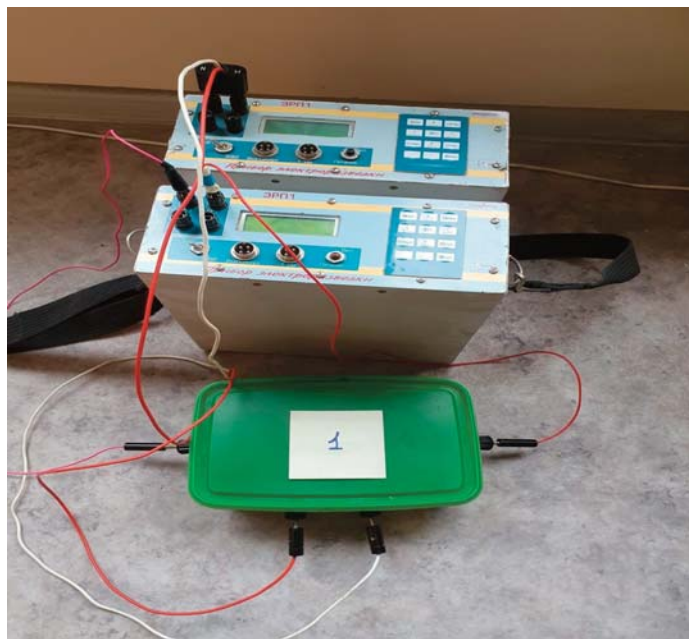


Рис. 2. Генератор и измеритель ЭРП-1.

Для каждого грунта была выполнена последовательность операций:

1. В емкость засыпался грунт.
2. Выполнялось измерение удельного электрического сопротивления «чистого» грунта.
3. В грунт равномерно по поверхности добавлялось дизельное топливо в объеме 0,5 л.
4. Выполнялось измерение удельного электрического сопротивления загрязненного грунта.
5. Измерения повторялись с частотой один раз в неделю на протяжении примерно 5 месяцев.

Полученные результаты

В табл. 1 представлены удельные электрические сопротивления «чистых» грунтов и грунтов со «свежим» загрязнением. Так как сопротивление нефтепродуктов очень высокое, после добавления дизельного топлива происходило резкое увеличение сопротивления грунта.

Измерения проводились в течение 169 дней, каждые 7 дней в лаборатории с постоянной температурой. В табл. 2 представлены результаты измерений на 169 день наблюдений в сравнении с «чистыми» и загрязненными грунтами в первый день наблюдений.

Таблица 1.

Удельное электрическое сопротивление «чистых» грунтов и грунтов со «свежим» загрязнением

Тип грунта	Чистый	Загрязненный
Супесь	77 Ом*м	320 Ом*м
Супесь с торфом	60 Ом*м	305 Ом*м
Почва	470 Ом*м	655 Ом*м

Таблица 2.

Значения удельных электрических сопротивлений в первый и последний день

Тип грунта	Чистый	Загрязненный (1-й день)	Загрязненный (169-й день)
Супесь	77 Ом*м	320 Ом*м	52 Ом*м
Супесь с торфом	60 Ом*м	305 Ом*м	24 Ом*м
Почва	470 Ом*м	655 Ом*м	230 Ом*м

На графике (Рис. 3) представлены результаты измерения удельного электрического сопротивления для супеси и для супеси с торфом загрязненных дизельным топливом. Также на графике показаны линии «чистых» грунтов.

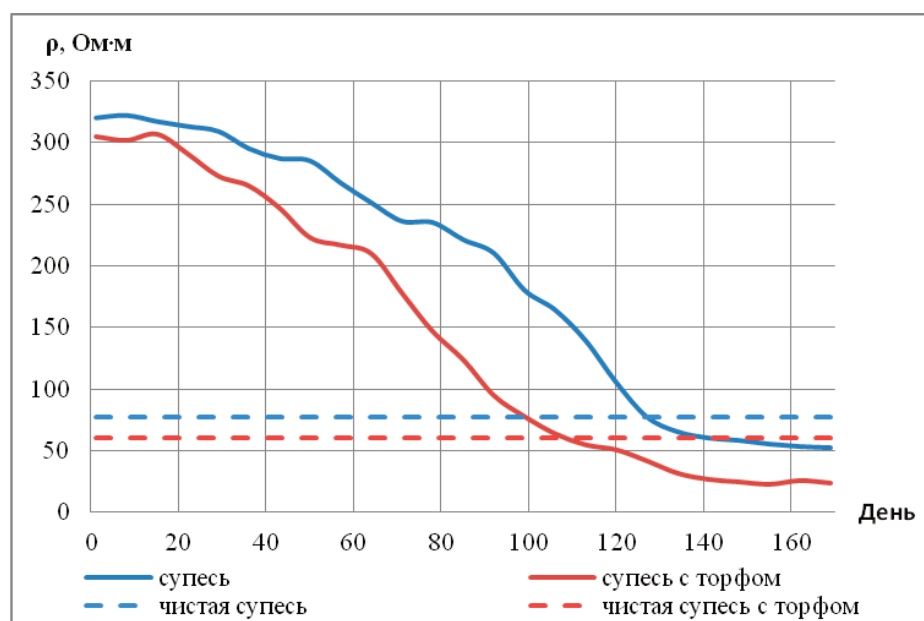


Рис. 3. График изменения удельных электрических сопротивлений для супеси и супеси с торфом.

На графике (Рис. 4) представлены результаты измерения удельного электрического сопротивления для дерново-подзолистых почв, загрязненных дизельным топливом. Также на графике показаны линии «чистой» почвы.

Анализируя графики можно отметить следующее. Значения удельных электрических сопротивлений вначале измерений практически не меняются, затем происходит резкое снижение сопротивлений, связанное с процессами биodeградации, потом скорость снижения сопротивлений уменьшается.

Итоговые значения сопротивлений оказываются меньше сопротивлений «чистых» грунтов. Пересечение графиков загрязненных грунтов с линией «чистых» для разных типов грунтов отличается.

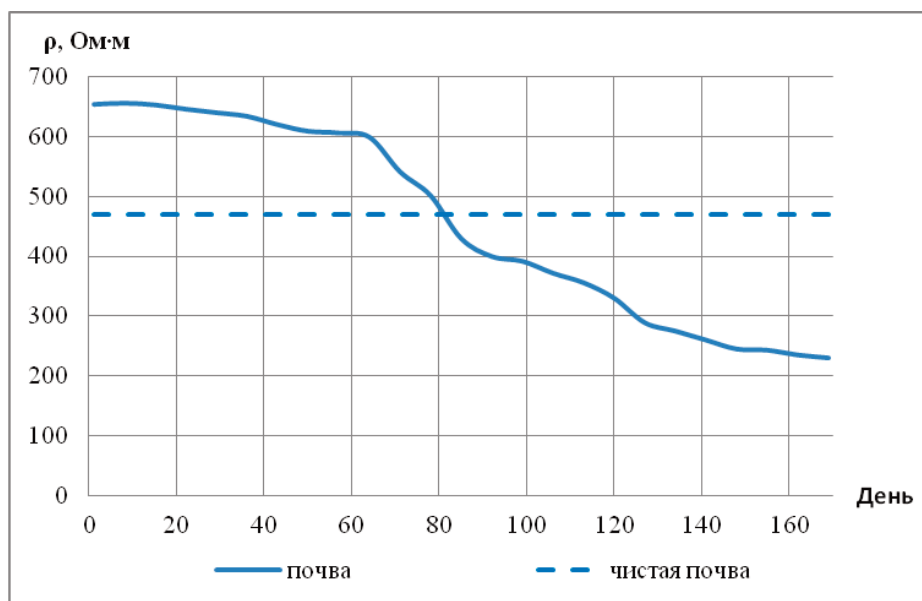


Рис. 4. График изменения удельных электрических сопротивлений для супеси и супеси с торфом.

В результате эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Удельное электрическое сопротивление свежего загрязнения очень высокое.
2. Скорость снижения значений сопротивлений зависит от типа грунта и количества бактерий. Добавление торфа в супеси вызвало ускорение процесса биodeградации.
3. Значения сопротивлений для «зрелого» загрязнения заметно ниже сопротивлений «чистых» грунтов за счет продуктов биodeградации углеводов, что может выступать поисковым признаком таких загрязнений при проведении геофизических работ методом сопротивлений.

Следует учесть, что скорость биodeградации, и как следствие, изменение удельных электрических сопротивлений в «естественных» условиях может быть отличной от данных, полученных в результате эксперимента. Это связано с возможными другими температурными условиями, другим содержанием кислорода и углекислого газа, другим составом нефтепродуктов. Но в целом, все изменения, связанные с биodeградацией, будут аналогичны [3].

Выводы

Существуют различные методы картирования загрязнений. Наиболее перспективными, с точки зрения скорости выполнения работ, наименьшими трудовыми затратами являются геофизические методы [7]. Их недостатком является то, что изучается не само загрязнение или загрязненный грунт, а изменение физических свойств в зоне загрязнения. Эти изменения могут быть вызваны не только загрязняющей компонентой, но, например, и сменой литологического состава. Это является достаточно существенным недостатком, влияние которого можно уменьшить, комбинируя геофизические методы с методами бурения, газогеохимической съемкой.

Наиболее сильно под воздействием загрязнения меняются удельные электрические сопротивления грунтов. Но необходимо учитывать в какой стадии биodeградации находится загрязнение. Наиболее удобными для картирования являются «зрелые» загрязнения, когда значения удельных электрических сопротивлений становятся очень низкими, нехарактерными для «чистых» грунтов.

В качестве методики проведения работ можно предложить площадные электроразведочные работы методом электропрофилирования, которые позволят оконтурить зону загрязнения по anomalно низким значениям сопротивления. А затем можно детально изучать эту зону методами зондирования или электротомографии [6]. Для подтверждения выделенной зоны необходимо применять бурение, газовую съемку и газогеохимические исследования.

Такая комплексная методика работ значительно уменьшит количество точек бурения, отбора проб для лабораторных исследований, что повысит скорость проведения работ и снизит общие трудовые затраты.

Литература

1. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации. Приборы и системы разведочной геофизики. 2006, N02, 14-17..
2. Боровский М.Я., Петрова Г.И., Пухов А.Г., Богатов В.И., Филимонов В.Н., Шакуро С.В. Оценка эколого-гидрогеологической ситуации в районах освоения нефтяных месторождений комплексом электроразведочных методов // Журнал ЭиПБ, № 1-2, 2014г.. Режим доступа: <https://www.ipbr.org/projects/vestnik/editions/> (дата обращения: 07.03.2020г.)
3. Назарько М.Д., Щербаков В.Г., Александрова А.В. Перспективы использования микроорганизмов для биодegradации нефтяных загрязнений почв. // Известия вузов. Пищевая технология, №4, 2004г. Режим доступа: <https://docviewer.yandex.ru/view/> (дата обращения: 15.10.2021г.)
4. Огильви А.А. - Основы инженерной геофизики. – М.: Изд-во «Недра», 1990г.
5. Плакс Д.П., Бабец М.А. Промысловая геофизика: учебное пособие – М.: Изд-во Минск БНТУ, 2016г.
6. Шевнин В.А., Делгадо О., Рыжов А.А. Картирование методом сопротивлений нефтяных загрязнений геологической среды. // Журнал разведка и охрана недр, 2004г., №5, с. 27-32. Режим доступа: <https://istina.msu.ru/publications/article/408817/> (дата обращения: 15.10.2021г.)
7. Шкабарня Н.Г. Картирование нефтяных загрязнений геологической среды с помощью геофизических методов. // Журнал Вологдинские чтения, 2008г. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/kartirovanie-neftyanyh-zagryazneniy-geologicheskoy-sredy-s-pomoschyu-geofizicheskikh-metodov> (дата обращения: 15.10.2021г.)
8. Ivanov A.A. Geophysical methods of detection of oil contamination on the example of waste disposal site of Priobskoye field / A. A. Ivanov, M. P. Shirobokov // Global View of Engineering Geology and the Environment - Proceedings of the International Symposium and 9th Asian Regional Conference of IAEG, Beijing, 24–25 сентября 2013 года. – Beijing, 2013. – P. 691-693. – DOI 10.1201/b15794-110/.

ОЦЕНКА ОБВОДНЕННОСТИ ТОРФЯНЫХ ГРУНТОВ ОСУШЕННЫХ БОЛОТ ПО ДИСТАНЦИОННЫМ ДАННЫМ

Т.В. Орлов¹, В. В. Бондарь¹, М.В. Архипова¹, К.Л. Шахматов²

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000, Россия. E-mail: tim.orlov@gmail.com

² Тверской государственный технический университет,
170026, г.Тверь, наб.Афанасия Никитина, 22. E-mail: krl81@list.ru

Введение

Дистанционная оценка состояния грунтов является очень перспективным направлением. Этот вид оценки не может заменить полностью наземные исследования, однако при грамотном подходе и с достаточным количеством полевых заверочных данных он позволяет давать быстрые результаты с хорошей точностью. Особенно перспективно применять такие исследования для оценки природных и техногенных пирогенных опасностей в болотных ландшафтах.

Основой решения задачи, как показали исследования, является использование индикационных свойств растительного покрова для оценки состояния осушенных и выработанных торфяников. Растительный покров осушенных и выработанных торфяников является важным компонентом, отражающим состояние всей природно-техногенной системы. Он выступает в роли индикатора состояний торфяника и отражает целый ряд процессов, происходящих в системе:

- состояние растительного покрова позволяет судить об отличии свойств торфяника от природных эталонных аналогов, включающем в себя степень нарушенности.
- растительный покров является показателем постоянной и сезонной обводненности частей болота, важного фактора, определяющего степень пирогенной опасности.
- по состоянию растительного покрова осушаемого или обводняемого торфяника через анализ сукцессий можно оценить темпоральные характеристики протекающих процессов,
- растительный покров несет следы пирогенной деятельности, которая является одним из основных факторов опасности заброшенных торфяников (Рис. 1).

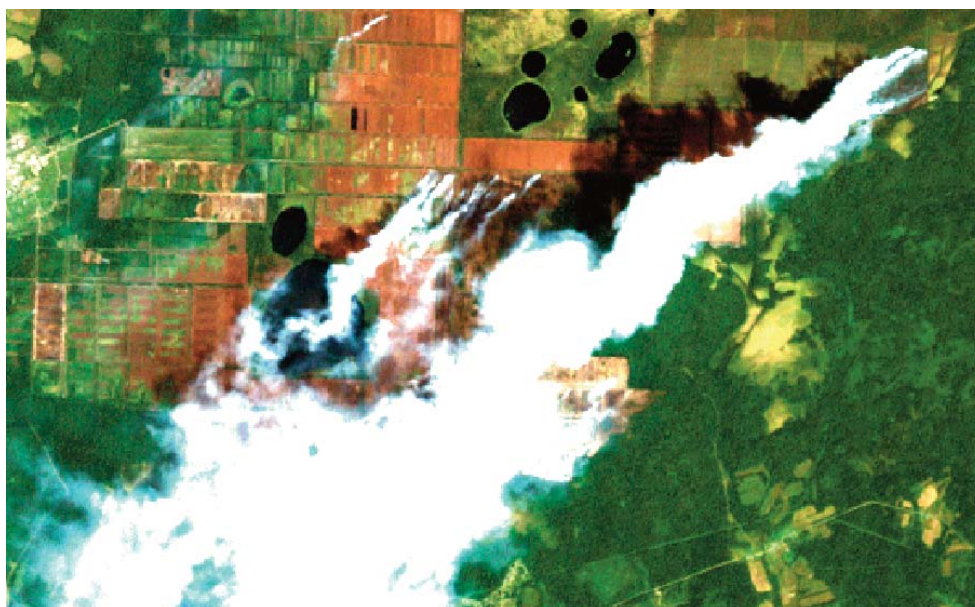


Рис. 1. Пример развития очага пожара в пределах осушенного торфяника на данных ДЗЗ (Оршинский мох (Тверская область), Landsat 7, 1 августа 1999 года).

Методы

Современные подходы и мировой опыт диктуют необходимость использования комплексных решений в картографировании состояния природно-техногенных систем [1].

Для повышения точности составления карт растительного покрова применительно к дистанционной оценке пирогенной опасности был разработан двухэтапный методический подход:

- построение предварительных карт растительности на основании, в первую очередь, разносезонной космической съемки среднего разрешения;
- построение карт растительности детального уровня на основании совместного использования космической съемки среднего и высокого разрешения.

Составление карт базируется на использовании различных дистанционных съемок с опорой на натурные наблюдения и измерения.

Использование двухэтапного подхода включает в себя преимущества обоих видов дистанционных съемок: для космической съемки среднего разрешения - это мультиспектральность и разносезонность, для космической съемки высокого разрешения - детальность.

Разработанный подход позволяет получать карты растительного покрова (Рис. 2).



Рис. 2. Карта растительного покрова для осушенного болотного массива «Заячий Отрог» Псковская область.

Для точной оценки уровней болотных вод (УБВ) требуются долгосрочные наблюдения во всех показательных частях естественной или искусственно созданной системы осушенных болот или осушенных торфяников.

Однако для оценки уровня воды в болоте можно использовать ряд методов:

1. Одноразовые измерения в реперных точках.
2. Анализ информации об уровнях воды в болоте на территории торфяника с помощью свойств индикации растительности.
3. Измерение разницы уровней воды в канавах и прилегающих поверхностях на основе цифровой модели местности, полученной при использовании беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).
4. Выявление зон сезонного (весеннего или осеннего) подъема и стагнации УБВ по многосезонным многоспектральным спутниковым снимкам.
5. Косвенная оценка положения УБВ по архивным данным очагов пожаров.

Основным методом определения УБВ является прямое измерение уровней в выбранных точках. Однако при таком подходе сложно обеспечить достаточно плотную сеть точек, и возникают проблемы с учетом сезонных колебаний УБВ.

Растительность - хороший индикатор среднегодового уровня воды в болотах [2]. Все растительные комплексы напрямую связаны с положением воды в торфе и косвенно отражают их состав и динамику в течение нескольких вегетационных периодов. Предполагая, что однородные классы будут характеризоваться тем или иным среднегодовым УБВ (табл. 2), можно экстраполировать точечные измерения на всю площадь торфяника.

Этот метод позволяет достаточно надежно оценить средний многолетний уровень воды в болотах, но для некоторых сообществ индикативные свойства растительности могут быть недостаточными.

Второй метод оценки может заключаться в использовании цифровой модели местности (ЦММ), полученной с БПЛА, для измерения разницы в высоте между положением воды в осушительных каналах, рассредоточенных по всей нарушенной территории, и поверхностью торфяных полей, что и является объектом изучения (Рис. 3).

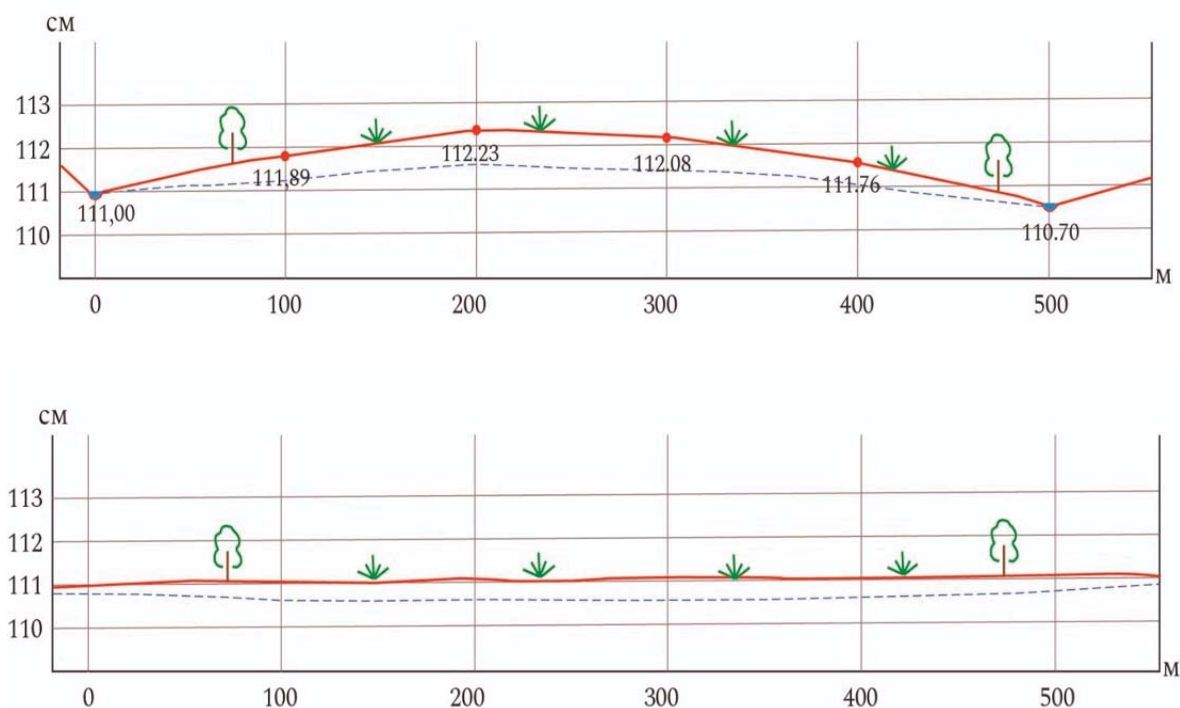


Рис. 3. Оценка уровня болотных вод по ЦММ.

С помощью разносезонных спутниковых снимков можно с достаточной точностью различить сообщества, затопленные во влажные сезоны года или для которых характерно расположение болотных вод близко к поверхности. Однако этот метод дает очень приблизительную информацию об уровне болотной воды, если уровень опускается ниже 10-15 см от поверхности торфяника.

Результаты

На основе обработки данных дистанционного зондирования и полевых наблюдений для осушенных торфяников в Псковской, Владимирской и Тверской областях была эмпирически получена связь между типом растительного покрова и уровнем болотных вод для нарушенных осушенных торфяников, которые на данный момент находятся в стадии естественного восстановления (таблица 1).

Полученные закономерности были применены для ряда объектов в Псковской, Владимирской и Тверской областях (Рис. 4).

Для объекта «Заячий отрог», Псковской области, были получены площади участков с различной степенью обводненности торфа (табл. 2).

Основной целью оценки площадей обводненности торфа по территории нарушенных объектов является получение информации об участках, находящихся в осушенном состоянии. Именно такие участки наиболее опасны в пирогенном плане. Для проанализированного объекта около 11% площади находится в состоянии избыточного обводнения, которое характеризуется превышением воды над поверхностью на 30-50 см. Менее одного процента площади находится в состоянии нормального

Таблица 1.

Связь между типом растительного покрова и уровнем болотных вод для осушенных торфяников (торф более 30 см)

Класс	Наименования	Уровень болотных вод, см
1, 2	Лесные болота и лесные культуры на верховых болотах	от -25 до -35
3, 4	Лесные болота и лесные культуры на низинных болотах	от -10 до -20
5,6	Осушенные верховые лесные болота с лесным покровом	от -30 до -80
7,8	Осушенные низинные лесные болота с лесным покровом	от -30 до -50
10	Луга на осушенных верховых болотах	от -50 до -100
11	Луга на осушенных низинных болотах	от -50 до -100
20	Не осушенные верховые болота	-10
21	Не осушенные низинные болота	-10
22	Осушенные верховые болота, на первых стадиях осушения	От -20 до -50
23	Восстановленные за счет естественного или искусственного заболачивания верховые болота	от -5 до +5
24	Восстановленные за счет естественного или искусственного заболачивания низинные болота	от -5 до +5
30	Торфодобыча – текущая или заброшенная – не зарастающая или слегка зарастающая	от -30 до -200
31	Торфодобыча – текущая или заброшенная – не зарастающая или слегка зарастающая	от -30 до -100
32	Переобводненные болота	от +20 до +30
40	Дренажные каналы верхового осушенного болота	от +110 до +200
41	Дренажные каналы низинного осушенного болота	от +110 до +200
50	Мелкие водоемы на верховом торфе	от + 50 до +150
51	Мелкие водоемы на низинном торфе	от + 50 до +150

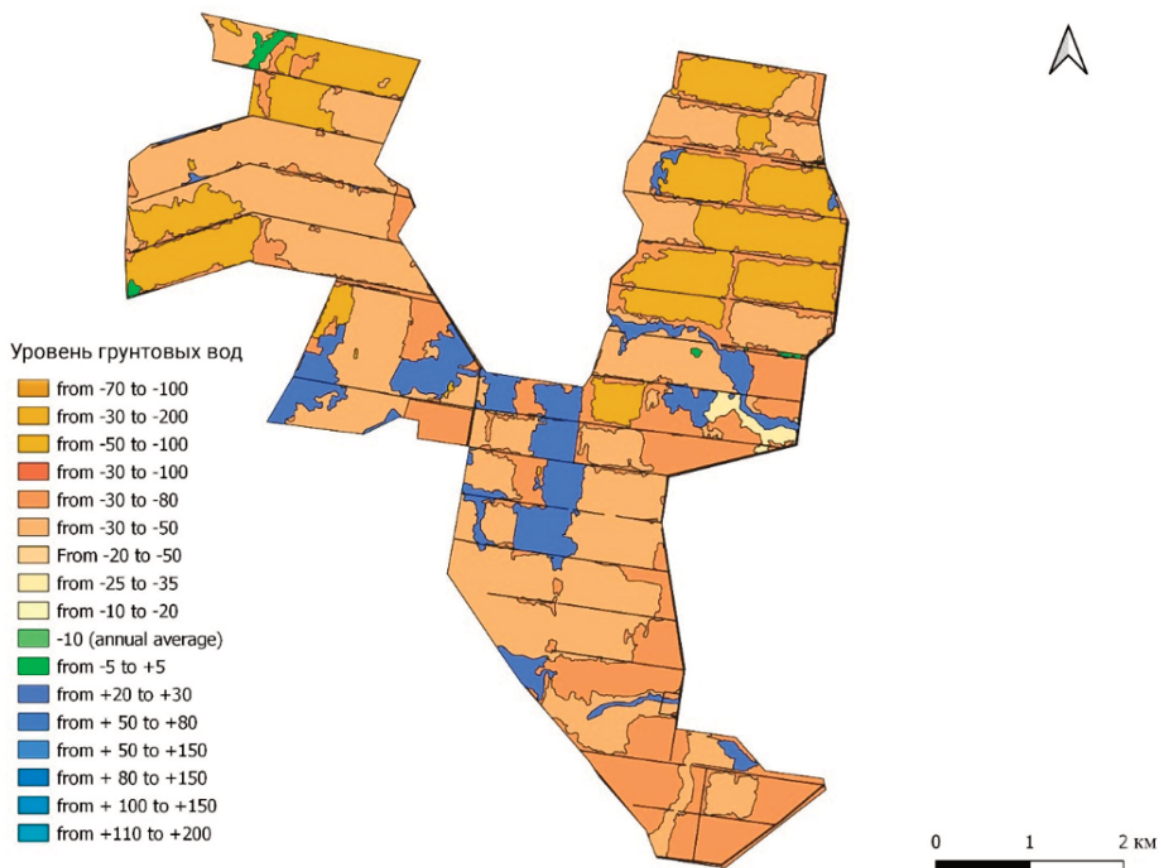


Рис. 4. Карта уровней болотных вод для участка «Заячий Отрог».

Таблица 2.

Обводненность объекта «Заячий отрог»

УБВ	Площадь, га	% от общей площади
от -50 до -100	1,92	0,07
от -30 до -200	555,23	20,25
от -30 до -80	657,03	23,96
от -30 до -50	1205,23	43,95
От -25 до -35	18,69	0,68
от -5 до +5	10,68	0,39
от +20 до +30	259,69	9,47
от + 80 до +150	13,17	0,48
от + 100 до +150	3,00	0,11
от +110 до +200	12,75	0,46
от + 100 до +250	4,80	0,18
Итого	2742	100 %

для болотных систем обводнения, когда уровни болотных вод колеблются в районе дневной поверхности. Состояние остальной территории (2400 га) характеризуется пониженным расположением УБВ, что определяется работающей осушительной сетью каналов. И это определяет высокую пожарную опасность этой территории.

Таким образом, на основе полученных результатов можно делать вывод о степени пожароопасности территории осушенных болот. Эти данные в дальнейшем могут быть использованы для разработки и проектирования работ по вторичному обводнению осушенных торфяников с целью снижения пирогенных рисков.

Выводы

Разработанный комплексный метод оценки обводненности болотных грунтов, который заключается в использовании различных дистанционных и полевых данных, позволяет с достаточной точностью оценить состояние уровня грунтовых вод и выделить наиболее осушенные участки болот, которые являются потенциально пожароопасными, особенно в засушливые летние периоды. На основе проделанной работы получены следующие результаты:

- разработан метод дистанционной оценки состояния осушенности торфяных грунтов для осушенных и выработанных торфяников на основании оценки типа растительного покрова.

- разработаны локальные эмпирические закономерности связи типов растительного покрова и положения уровней болотных вод. Наиболее высокий уровень болотных вод наблюдается на лугах осушенных и низинных болот, а также на участках торфодобычи, зарастающих или частично зарастающих.

- проведена оценка состояния торфяных грунтов для одного из объектов в Псковской области, площадью 2700 га. Было получено, что 88% его площади находится в осушенном состоянии, что показывает значительную пирогенную опасность торфяника.

В дальнейших работах необходимо продолжать накапливать полевые данные и совмещать их с дистанционными данными, что позволит повысить их точность и достоверность.

Благодарности

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН и плана НИР по теме No г.р. АААА–А19–119021190077–6, а также при поддержке проекта «Восстановление торфяных болот в России в целях предотвращения пожаров и смягчения изменений климата» Международной инициативы по защите климата».

Литература

1. *Sirin, A., Medvedeva M., Maslov A., Vozbrannaya A. (2018). Assessing the Land and Vegetation Cover of Abandoned Fire Hazardous and Rewetted Peatlands: Comparing Different Multispectral Satellite Data. Land. 7. 71. 10.3390/land7020071.*
2. *Harris A., Bryant R. (2008). A multi-scale remote sensing approach for monitoring northern peatland hydrology: Present possibilities and future challenges. Journal of Environmental Management. 90. 2178-2188. 10.1016/j.jenvman.2007.06.025.*

МЕТОДЫ ЛИТОЛОГИИ В РЕГИОНАЛЬНОМ ГРУНТОВЕДЕНИИ

Т.Г. Рященко

Институт земной коры СО РАН, 664033, г.Иркутск, ул.Лермонтова, 128.
E-mail: ryashenk@crust.irk.ru

Введение

В период работы Всесоюзной программы по изучению опорных разрезов лессовых пород на территории СССР (1986-1990 гг.) была поставлена задача о необходимости использования методов классической литологии при их инженерно-геологической оценке. Под руководством академика Е.М. Сергеева [22] разработаны методические указания по комплексным исследованиям состава, микроструктуры и различных свойств лессовых толщ Украины, Молдовы, Европейского, Сибирского и Средне-Азиатского регионов, которые проводились усилиями многочисленных специалистов в рамках ВМНТК – временного межотраслевого научно-технического коллектива. Результаты этой программы через 20 лет были представлены в виде монографии [7], где в качестве примера приведены материалы по ключевому участку «Иркутск» (Верхнее Приангарье), полученные сотрудниками Института земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН) – участниками указанной программы.

В настоящее время (начало XXI века) «идеи» о практическом применении методов литологии в региональном грунтоведении почти «забыты», несмотря на общепризнанный тезис о необходимости развития литогенетического подхода при изучении глинистых пород. «При разработке теории формирования свойств глин необходимо говорить не о генетическом, а литогенетическом подходе, подразумевая под ним весь комплекс процессов, происходящих на стадии седиментогенеза и постседиментационных преобразований» [8].

Использование методов литологии в региональном грунтоведении предполагает реализацию системного подхода, при этом для развития любой системы необходима новая разнообразная информация, которая постоянно возникает, накапливается и анализируется [9; 15]. С этой точки зрения применение литологических методов при инженерно-геологической оценке дисперсных грунтов решается задача развития системы и в конечном итоге – литогенетического направления в региональном грунтоведении.

К сожалению, программ, аналогичных «Опорным разрезам лессовых пород», давно не существует. В практике инженерно-геологических изысканий методы литологии обычно не используются по причине отсутствия лабораторной базы, специалистов и финансовой возможности проводить эти исследования в других организациях. Ретроспективный обзор публикаций по югу Восточной Сибири показывает, что изучение минералогии терригенных компонентов лессовых, глинистых и песчаных грунтов при их инженерно-геологической оценке занимало одно из ведущих мест в составе комплексной аналитики и рассматривалось в качестве корреляционно-генетического критерия [12, 13].

Сегодня (2008-2021 гг.) в лаборатории инженерной геологии и геоэкологии (грунтоведческая группа), а также в Центре коллективного пользования (ЦКП) «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН) постоянно применяется комплекс литологических методов изучения состава лессовых, глинистых и песчаных грунтов при их инженерно-геологической оценке на различных ключевых участках (Монголо-Сибирский регион и сопредельные территории) [14, 15, 16, 17 и др.].

Основной «круг» лабораторных исследований включает реализацию следующих методов: 1) количественный иммерсионный анализ фракции 0,25-0,05 мм; 2) метод порошковой дифракции; 3) рентгеноструктурный анализ фракции <0,001 мм (РСА); 4) экспресс-метод оценки состава глинистых минералов; 5) программный комплекс «Decompose»; 6) метод силикатного анализа с расчетом специальных геохимических коэффициентов; 7) рентгенофлуоресцентный метод спектрального анализа (РФА). Ниже приводится краткое описание этих методов.

Методы литологии при инженерно-геологической оценке дисперсных грунтов (ИЗК СО РАН)

Количественный иммерсионный анализ

При изучении минерального состава лессовых и глинистых отложений в настоящее время применяется преимущественно рентгеновский анализ, когда по валовой пробе определяется содержание всего набора минералов (легких, тяжелых и глинистых) и так называемого рентгеноаморфного вещества [24]. В то же время к числу традиционных (классических) методов литологии относится иммерсионный анализ, который позволяет получить информацию о содержании преобладающих, второстепенных и акцессорных минералов легкой и тяжелой фракций. В 1947 г. была опубликована монография В.П. Батурина «Петрографический анализ геологического прошлого по терригенным компонентам», которая явилась основой нового научного направления [1]. Иммерсионный метод основан на сравнении показателя преломления минерала с вмещающей средой – иммерсионной жидкостью с известным значением этого показателя [4]. Предварительно проводится гранулометрический анализ образца по методу А.Н. Сабанина, который не предполагает использования каких-либо химических диспергаторов для разрушения агрегатов, поэтому определяется реальное содержание указанных фракций, в том числе и глинистой ($<0,002$ мм). Сначала отмывается глинистая фаза (частицы $<0,002$ мм), определяется ее содержание, остальная часть пробы высушивается и ситовым методом устанавливается содержание шести фракций: >1 мм; 1,0-0,5; 0,50-0,25; 0,25-0,10; 0,10-0,05; $<0,05$. Для определения минерального состава терригенных компонентов исследуется преимущественно фракция 0,25-0,05 мм, которая с помощью бромформа подразделяется на легкую (плотность $<2,9$ г/см³) и тяжелую (плотность $>2,9$ г/см³) составные части, готовятся специальные препараты для просмотра на поляризационном микроскопе, ведется подсчет зерен различных минералов и определяется их содержание (%). Для легкой и тяжелой фракций по преобладающим минералам устанавливаются минеральные ассоциации, а также рассчитываются коэффициенты зрелости (Kz) и устойчивости (КУ).

Коэффициент зрелости представляет собой отношение содержания устойчивого к выветриванию кварца и неустойчивых полевых шпатов (кв/пш), устойчивости – отношение содержания устойчивых циркона и турмалина к неустойчивым амфиболам и пироксенам (ц+тур/ам+п). Повышенные значения этих коэффициентов являются свидетелями химической зрелости отложений.

Метод порошковой дифракции

В настоящее время при изучении минерального состава новых объектов применяется метод порошковой дифракции, который объединяет качественный (фазовый) и полуколичественный анализы. В ЦКП «Геодинамика и геохронология» съемка образцов проводится на рентгеновских дифрактометрах D8 Advance (Bruker AXS, Германия) и ДРОН-3 (Россия). Фазовый состав проб расшифровывается с помощью программы EVA (Diffraс PDF-2, 2007), а также Американской картотеки ASTM PDF. Полуколичественное соотношение компонентов рассчитывается по корундовым числам методом RIR [25]. Полученные соотношения фаз носят приближенный характер. Для аппарата ДРОН-3.0 условия съемки следующие: излучение Cu K α , Ni-фильтр, V – 25 кВ, I=20 мА, угловой диапазон 3-65° 2 θ со скоростью измерения – 1°/мин.

Пробы готовятся следующим образом: воздушно-сухой образец растирался до пудры в агатовой ступке с добавлением спирта (порошковый препарат), дополнительно (для определения глинистой фазы) проводится истирание резиновым пестиком в дистиллированной воде. Полученная суспензия наносится на предметное стекло и высушивалась при комнатной температуре. Таким образом, для каждого образца выполняется четыре съемки: порошкового препарата, воздушно-сухой суспензии, затем насыщенной этиленгликолем и прокаленной до 550 °С.

Рентгеноструктурный анализ фракции $<0,001$ мм (РСА)

Для идентификации глинистых минералов проводится подготовка ориентированного материала проб осаждением глинистой фракции на стеклянной подложке, затем в первом случае проводится прогревание при температуре +550°С в течение трех часов, во втором – насыщение этиленгликолем. По специальной таблице с указанием основного рефлекса и поведения при нагревании и насыщении

этиленгликолем определяется преобладание того или иного глинистого минерала. Съемка рентгенограмм проводится на дифрактометре Дрон-3.0.

Экспресс-метод

В 1977 г. были опубликованы методические рекомендации по определению емкости катионного обмена (ЕКО) почв и грунтов при инженерно-геологических и почвенно-мелиоративных изысканиях [6], которые в дальнейшем получили наименование «Метод Л.И. Кульчицкого» [3]. На основе этого метода в группе грунтоведения ИЗК СО РАН был разработан «Экспресс-метод» полуколичественной оценки состава глинистых минералов фракции <0,001 мм [18, 26].

На фотоэлектроколориметре ФЭК-57 проводятся измерения оптических плотностей фильтрата фракции после ее взаимодействия с красителем метиленовым голубым (D2) и исходного раствора этого красителя (D1), далее ведется расчет емкости катионного обмена фракции (ЕКО¹) по специальной формуле:

$$EKO^1 = [K \cdot (D_1 - D_2) \cdot V] / g,$$

где K=6,16 (указан в паспорте прибора ФЭК-57); V – количество исходного раствора красителя (50 см³); g – навеска грунта (1-3 г). В процессе исследований выделено две группы образцов: 1) глины мелового возраста (г.Сайншанд, Монголия), фракции которых, по данным РСА, содержали 70-80% смектита; ЕКО¹ составила 58-82 мг-экв на 100 г вещества; 2) супесчано-суглинистый заполнитель крупнообломочных четвертичных отложений из района г.Билибино на северо-востоке Сибири, фракции которых содержали только гидрослюды; ЕКО¹ составила 6-19 мг-экв на 100 г вещества. Затем была составлена специальная таблица (более 500 образцов) с данными ЕКО¹ и, в некоторых случаях, результатами рентгеноструктурного анализа (РСА). Этой таблицей можно пользоваться для полуколичественного определения состава глинистых минералов исследуемой фракции, для которой выполнены только измерения ЕКО¹.

Программный комплекс «Decompose»

На основе химического состава фракции <0,001 мм и базовых химических составов смектитов, гидрослюд, хлоритов и каолинита проводятся расчеты количественного содержания глинистых минералов в исследуемом образце с учетом данных рентгеноструктурного анализа фракции.

Разработка программного комплекса «Decompose» для определения количественного содержания различных глинистых минералов в лессовых и глинистых грунтах юга Восточной Сибири в процессе их инженерно-геологической оценки началась в 80-х годах прошлого века. Метод основан на процедуре решения задачи модифицированным симплекс-методом, который позволяет проводить расчеты по результатам химических анализов фракций при сохранении данных матрицы составов эталонных минералов. Программа оптимальных расчетов по чебышевскому критерию максимальной ошибки составлена О.А. Халиулиной по алгоритму И.К. Карпова [23]. Перевод программного комплекса на персональный компьютер и доведение его до рабочего состояния выполнены сотрудником Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН Л.А. Козьминым. В дальнейшем метод широко применялся при изучении лессовых отложений, распространенных на территории г.Иркутска, а также лессово-глинистых толщ Прибайкалья, Забайкалья и Западной Монголии [20].

Исследования по программе «Decompose» начинаются с проведения для образцов рентгеноструктурного анализа (РСА) для выявления групп с определенным набором глинистых минералов; одновременно выделяется фракция <0,001 мм и методом силикатного анализа определяется в ней содержание SiO₂, Al₂O₃, Feобщее (Fe₂O₃+FeO), MgO, CaO, Na₂O, K₂O, ппп (при пересчете на абсолютно сухую навеску образца). Программный комплекс позволяет рассчитать содержание различных по химическому составу модификаций глинистых минералов: среди смектитов (их выделяется восемь – C₁₋₈), гидрослюд – пять (Гс₁₋₅), хлоритов – четыре (X₁₋₄), каолинита – один (К); имеется матрица базисных (эталонных) химических составов минералов глинистой фракции. Расчеты ведутся в системе FAR; необходимо знать, какие минералы представляют фракцию (используются результаты РСА) и для них выбираются данные эталонного химического состава (вектор А), затем вводится химический состав исследуемого объекта (вектор В). В решении присутствует

содержание указанных минералов (%). Примеры таких решений можно посмотреть в монографии «Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь)» [14, с. 248-251].

Решение дает содержание минералов (в долях единицы) в том порядке, в котором расположены данные химического состава «эталонных». Представляем задачу, где минералы имеют следующий порядок: каолинит (К), смектит (С₁₋₈), гидрослюды (Гс₁₋₅), хлорит (Х₁₋₄). При записи результатов содержание минералов переводим в проценты и получаем минеральный состав глинистой (<0,001) фракции:

$$\text{Обр. 1363} - 2,5 \text{ м: } K_{37,1} C_{521,3} C_{821,1} G_{c37,7} X_{10} \Sigma=97,2 \%$$

Затем минералы располагаем по степени уменьшения их содержания, (проценты приводим в целых числах) и записываем «формулу» минерального состава фракции:

$$\text{Обр. 1363} - 2,5 \text{ м: } C_{43} [C_{522} C_{821}] K_{37} X_{10} G_{c38} \Sigma=98 \%$$

Для исследованного образца отмечается каолинит-смектитовая минеральная ассоциация с примесью хлорита (10%) и гидрослюды (8%); смектит представлен двумя разновидностями – с повышенным содержанием SiO₂ (С₅) и Fe_{общ.} (С₈); хлорит относится к разновидности, обогащенной MgO (Х₁), гидрослюда – Fe_{общ.} (Гс₅).

Метод силикатного анализа

Определяется содержание породообразующих элементов в оксидной форме: SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, MnO, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, P₂O₅, H₂O. В сумму оксидов также входит определенная при 1000°C потеря при прокаливании (ппп). Силикатный анализ дисперсных грунтов выполняется в химической группе ЦКП «Геодинамика и геохронология», завершается подсчетом суммы всех компонентов, которая должна быть близкой к 100% (различия допускаются <1%). Содержание SiO₂, TiO₂, Fe₂O₃ (общее – как сумму Fe₂O₃+FeO), Al₂O₃ и P₂O₅ определяется методом спектрофотометрии.

Содержание элементов из растворов окрашенных разновидностей устанавливается на спектрофотометрическом комплексе ENESYS 10S, Thermo Fisher Scientific, США. Для определения CaO, MgO, MnO, (Fe₂O₃+FeO) используется метод атомно-абсорбционной спектрометрии. Построение градуировочных графиков проводилось с использованием стандартных образцов (СО) [19].

По результатам силикатного анализа проводится расчет девяти геохимических коэффициентов (табл. 1) [5; 2].

Формулы геохимических коэффициентов		<i>Таблица 1.</i>
Геохимические коэффициенты	Формулы	
Кремнекислый, K_i	$K_i = SiO_2/Al_2O_3$	
Зрелости, K_z	$K_z = Al_2O_3/Na_2O$	
Основной, BA	$BA = (CaO+K_2O+Na_2O)/Al_2O_3$	
Щелочной, K_h	$K_h = K_2O/Na_2O$	
Карбонатности, K_k	$K_k = CaO/MgO$	
Окисления, K_o	$K_o = FeO/Fe_2O_3$	
СИА	$[Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O)] \cdot 100$	
СИW	$[Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+Na_2O)] \cdot 100$	
ICV	$[Fe_2O_3+K_2O+Na_2O+CaO+MgO+TiO_2]/Al_2O_3$	

Коэффициенты кремнекислый, зрелости и основной отражают степень химической зрелости отложений; CIA, CIW, ICSV – индексы химического изменения вещества, связанного с климатическими особенностями условий формирования отложений (так называемые климатические модули) [2].

Рентгенофлуоресцентный метод спектрального анализа (РФА)

Определение содержания микроэлементов выполняется с помощью спектрометра S8 TIGER (Германия, фирма Брукер) [11]. Устанавливается содержание (ppm) V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As, F, Sn, Ba, La, Ce, Nd, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ga, S, Cl, U, Th (всего 24); ppm=0,0001%. Выделяется группа токсичных микроэлементов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As, F), по содержанию которых рассчитывается показатель загрязнения: $Z_c = \sum [K_d - (n-1)]$, где K_d – коэффициент концентрации i-элемента в образце, равный для Co, Ni, Cu, Zn отношению концентрации токсичного элемента к фоновому содержанию, для Pb, As – отношению их содержаний к предельно допустимым концентрациям (КПД); n – число учитываемых элементов (n=6) [10]. Показатель Z_c характеризует удовлетворительную (<16), критическую (16-32), чрезвычайную (32-128) и катастрофическую (>128) ситуацию по степени загрязнения отложений [21].

Далее можно получить коэффициенты концентрации (K_c) токсичных микроэлементов. Эти коэффициенты показывают отношение конкретного содержания компонента (среднего и максимального) к величине кларка (по А.П. Виноградову)

Заключение

Обзор материалов ретроспективного и современного характера относительно применения методов литологии при инженерно-геологической оценке дисперсных грунтов (песчаных, лесовых, глинистых), распространенных в пределах Монголо-Сибирского региона и на сопредельных территориях, показал необходимость развития литогенетического подхода в региональном грунтоведении.

Изучение минерального, химического и микроэлементного состава различных геолого-генетических комплексов дисперсных грунтов позволяет решать задачи корреляционно-генетического и геоэкологического характера как на участках развития природных и природно-техногенных экзогенных геологических процессов различной степени опасности, так и непосредственно в пределах строительных площадок, где ведутся инженерно-геологические изыскания.

С точки зрения геоэкологической безопасности особое значение имеет изучение микроэлементного состава грунтов (прежде всего, техногенных) с расчетами специального показателя загрязнения (Z_c) токсичными микроэлементами (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As, F). По значению этого показателя оценивается степень загрязнения грунта: ситуация может быть удовлетворительной ($Z_c < 16$), критической (16-32), чрезвычайной (32-128) или катастрофической (>128). На основании этих данных принимаются соответствующие решения.

Литература

1. Батурин В.П. Петрографический анализ геологического прошлого по терригенным компонентам. – М.–Л. 1947. 339 с.
2. Интерпретация геохимических данных / Е.В. Скляр, Д.П. Гладкочуб, Т.В. Донская и др. М.: Интермет Инженеринг, 2001. 288 с.
3. Лабораторные работы по грунтоведению: Учебное пособие / Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королева. – М.: КДУ, Университетская книга, 2017. 634 с.
4. Логвиненко Н.В. Петрография осадочных пород (с основами методики исследований). – М.: Высшая школа, 1974. – 400 с
5. Лукашев В.К. Геохимия четвертичного литогенеза. – Минск: Наука и техника, 1970. 294 с.
6. Методические рекомендации по определению физико-химических свойств почв и грунтов при инженерно-геологических и почвенно-мелиоративных изысканиях / Под редакцией Л.И. Кульчицкого. – М.: Союзводпроект, 1977. 68 с.
7. Опорные инженерно-геологические разрезы лессовых пород Северной Евразии / В.Т. Трофимов, С.Д. Балыкова, Т.В. Андреева и др. – М.: КДУ, 2008. Опорные инженерно-геологические разрезы ..., 2008. 608 с

8. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. – М.: ГЕОС, 2013. 576 с
9. Петраков Н.Я. Русская рулетка: экономический эксперимент ценою 150 миллионов жизней. – М.: Экономика, 1998. 260 с.
10. Порядин А.Ф., Хованский А.Д. Оценка и регулирование качества окружающей природной среды. – М.: Издательский дом «Прибой», 1996. 350 с.
11. Ревенко А.Г. Физические и химические методы исследования горных пород и минералов в Аналитическом центре ИЗК СО РАН // Геодинамика и тектонофизика, Том 5(1). 2014. С. 101-114
12. Ряценок Т.Г. Опыт применения кластер-анализа при инженерно-геологических исследованиях // Инженерная геология. 1980. № 3. С.108-114
13. Ряценок Т.Г. Литогенез и инженерно-геологическая оценка четвертичных отложений (Восточная Сибирь). – Новосибирск: Наука СО, 1984. 164 с.
14. Ряценок Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010. 287 с.
15. Ряценок Т.Г. Системный анализ циклично построенных разрезов четвертичных глинистых и лессовых отложений // Отечественная геология. 2015. № 3. С. 53-6.
16. Ряценок Т.Г. Лессовый пролювий Забайкалья: литология, микроструктура, свойства (на примере опорного разреза «Десятниково») // Известия СО секции наук о Земле РАЕН. 2016. С. 57-68
17. Ряценок Т.Г. Литологические записи уникальных природных событий в песчано-глинистых отложениях пещеры Горомэ (Окинское плато) // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 102-110.
18. Ряценок Т.Г., Данилова Т.Ф. К методике прогноза физико-химической активности пород и минерального состава их глинистой фракции // Изменения геологической среды и их прогноз. – Новосибирск: Наука, 1985. С. 36–46.
19. Ряценок Т.Г., Ухова Н.Н. Химический состав дисперсных грунтов: возможности и прогнозы (юг Восточной Сибири). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2008. 131 с.
20. Ряценок Т.Г., Ухова Н.Н., Щетников А.А., Рыжов Ю.В. Глинистые минералы дисперсных грунтов Монголо-Сибирского региона (методы и прогнозы) // Отечественная геология. 2012. № 6. С.56–65.
21. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. Геохимия окружающей среды – М: Недра, 1990. 335 с.
22. Сергеев Е.М. Теоретические основы исследования лессовых пород в опорных разрезах на территории СССР. – М.: ПНИИИС, 1988. 15 с.
23. Сутурин А.Н., Сутурина Т.А., Ряценок Т.Г. Программный комплекс количественной оценки содержания глинистых минералов и его роль в прогнозе инженерно-геологических свойств пород // Моделирование и прогнозирование геофизических процессов. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1986. С. 72-89.
24. Шлыков В.Г., Харитонов В.Д. К методике количественного рентгеновского анализа минерального состава грунтов / Геозкология. 2001. № 2. С. 129–140.
25. Hubbard C.R., Snuder R.I. RIR – Measurement and Use in Quantitative XRD // Powder Diffraction. 1988. V. 3. P. 74–77.
26. Ryashchenko T.G. New techniques for determination of clay fraction in soils // Proc. Seventh Intern. Congress Intern. Assoc. of Engineering Geology (Lissabon, 5-10 September, 1994). V. 2. – Rotterdam: Balkema, Brookfield, 1994. P. 677-682.

О ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИКИ ГРУНТОВ

А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин, В.А. Васенин

Институт «Геореконструкция», г.Санкт-Петербург, Измайловский пр., 4.
E-mail: mail@georec.spb.ru

Введение

Грунт является, наверное, самой сложной средой, с которой сталкиваются строители. И дело здесь не только в таком явлении как «нелинейность» зависимости между напряжениями и деформациями. Сто с небольшим лет назад вопрос о том, можно ли применять к грунтам расчетный аппарат механики сплошного деформируемого тела был весьма острым. Не лучше ли подходит к описанию поведения водонасыщенного глинистого грунта аппарат гидравлики, течения вязких жидкостей? Со временем был достигнут некий консенсус, заключающийся в том, что грунт нелинейная среда, но абсолютное большинство строительных объектов связано с однократным нагружением основания. Следовательно, можно криволинейную зависимость заменить секущей прямой в определенном диапазоне напряжений и деформаций. Так грунт стал рассматриваться как квазилинейная среда. Напоминанием об этом служит модуль деформации (а не упругости) грунта.

Было решено, что глинистый грунт - вязкая среда, деформации которой развиваются во времени, но, если рассматривать конечные осадки, то вопросы реологии отходят на второй план.

С развитием вычислительной техники, когда появился инструмент для решения нелинейных задач, а именно численные методы и реализующие их программные продукты, сразу же начались попытки построения сложных моделей механики грунтов.

Модели механики грунтов исторически развиваются преимущественно как феноменологические, т.е. их применимость не может выходить за рамки тех предпосылок и экспериментальных данных, на которых они были построены. За пределами этих рамок прогнозная способность моделей становится неопределенной.

Вопрос оценки конечной осадки связан с другим не менее важным вопросом: что именно считать конечной осадкой. Как показывает опыт построения инженерных методов расчета конечных осадок в нашей стране и в мире, конечной осадкой обычно считается та, на которой остановились натурные наблюдения за реальными объектами у авторов метода. Это отнюдь не означает, что при этом прекратились сами осадки (на этом подробнее остановимся ниже).

По мере накопления результатов натурных измерений за реальным поведением построенных объектов, по мере совершенствования лабораторной и полевой базы исследования грунтов, проявлялись все новые и новые особенности деформационного поведения грунта при различном нагружении, которые приводили к уточнению исходных моделей, введению в них все новых и новых модификаций.

Однако вопрос точности прогноза деформаций грунтов по различным моделям остается открытым. В многочисленных статьях разных авторов приводятся сопоставления расчетов и наблюдений, но эти сопоставления носят, как правило, апостериорный характер, то есть расчеты выполнены после наблюдений, когда результаты уже известны. Как и следует предположить, в этом случае расчеты по самым разным моделям, как правило, совпадают с результатами наблюдений. Напротив, немногочисленные публикации, в которых различным авторам предлагали решить одну и ту же задачу, показывают значительный (часто в несколько раз) разброс результатов расчетов. Очевидно, основной задачей геотехнических расчетов является не обратный анализ уже имеющихся наблюдений, а прогноз деформаций для решения практических задач геотехники. Поэтому очень важной задачей для развития моделей является создание базы данных наблюдений за длительными деформациями, на которой можно проверять качество прогнозов, генерируемых различными моделями.

1. Натурные измерения и прогноз конечной осадки

Петербургская школа механики грунтов всегда уделяла большое внимание натурному измерению развития осадок зданий во времени. Еще в 1936 г. Н.А. Цытович начал измерения осадок нескольких

зданий [1]. В послевоенные годы Б.Д. Васильев наблюдал за осадками другой группы зданий [2]. В 1960-х гг. С.Н. Сотников организовал геодезические наблюдения за зданиями массового серийного строительства [3]. Сложность работ, посвященных осадкам зданий и сооружений на слабых грунтах, вполне естественна: они растягиваются на долгие годы. При этом результат работ чаще всего требуется выдать во вполне обозримые сроки – через 3-5 лет. Результаты таких наблюдений стали основой для разработки методов расчета осадки, которые легли в основу российских геотехнических норм. Измерения осадок московских «сталинских высоток», выполненные сотрудниками К.Е. Егорова, послужили основой для разработки им собственного метода расчета [4] (Рис. 1). Измерения осадок ленинградских зданий группой Н.А. Цытовича (Рис. 2) стали базой другого метода [1].

Для оценки точности прогноза осадок зданий была выполнена повторная нивелировка зданий, наблюдения за осадками которых начинали Н.А. Цытович, Б.Д. Васильев, С.Н. Сотников. Кроме поиска сохранившихся марок пришлось решить и проблему собственных осадок геодезических реперов, относительно которых ведутся измерения. В результате В.А. Васенину удалось построить графики развития осадок во времени для 30 зданий, возведенных от 23 до 77 лет назад [5]. Оказалось, что здание школы на ул. Опочинина за прошедшие 77 лет получило осадку 23 см (Рис. 3), что ровно вдвое выше осадки, накопленной на момент прекращения наблюдений Н.А. Цытовичем (Рис. 2). Нетрудно догадаться, что метод Н.А. Цытовича дает в этом случае ошибку в 2 раза.

Не лучше обстоит дело и с другими методами расчета осадки. Сравнение натурных измерений и расчетов показывает, что основной метод российских норм – метод послойного суммирования недооценивает осадку петербургских зданий в 2,3 раза (Рис. 4).

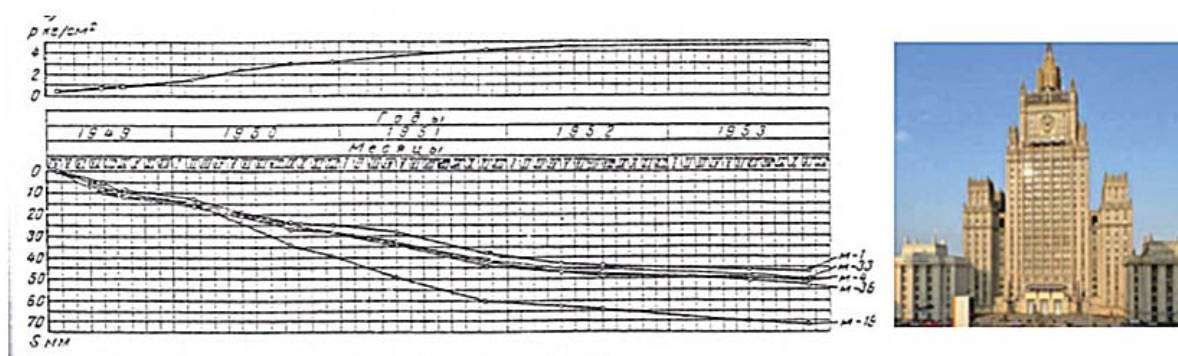


Рис. 1. Наблюдения за осадками высотного здания на Смоленской площади, г.Москва (К.Е. Егоров, 1949-1954 гг.) [4].

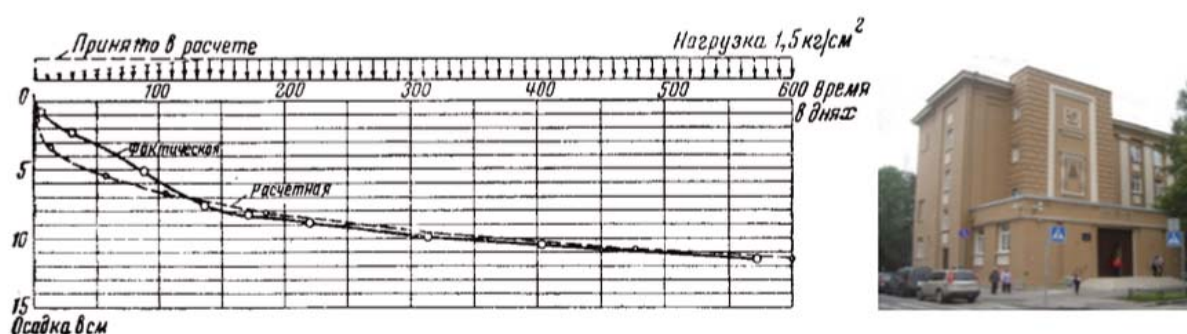


Рис. 2. Развитие осадки здания школы на ул. Опочинина в Ленинграде (Н.А. Цытович, 1936-1938 гг.); рисунок взят из знаменитого учебника «Механика грунтов» [1].

Интересно отметить, что в процессе строительства реализуется порядка 30% наблюдаемых осадок. Насколько же долго развиваются осадки зданий, построенных на слабых грунтах?

2. О длительных («вековых») осадках зданий на слабых грунтах

Мы уже упоминали о том, что реперы, установленные на цоколях зданий в Санкт-Петербурге, получают осадку вместе со зданиями. Для того, чтобы исключить ошибку при выносе вертикальных отметок, в Санкт-Петербурге каждые 20-30 лет проводятся повторные нивелировки всех знаков го-

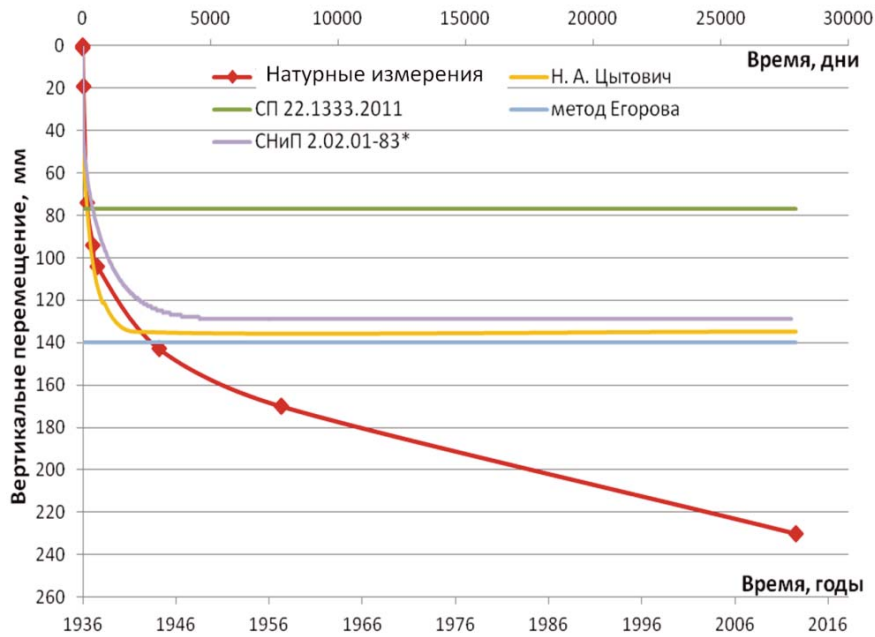


Рис. 3. Результаты длительных наблюдений (77 лет с момента постройки) за осадками здания школы на ул. Опочинина в Санкт-Петербурге и сравнение с инженерными методами расчета.

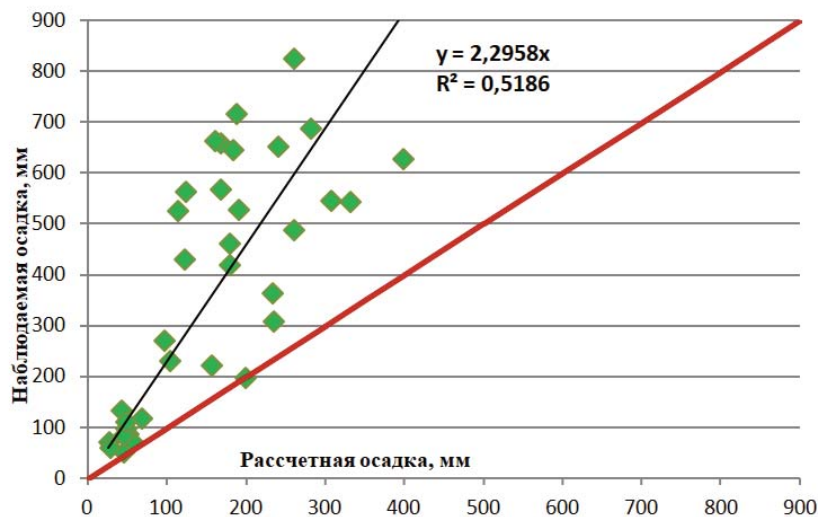


Рис. 4. Сравнение наблюдаемой осадки и рассчитанной по методу послойного суммирования (для выборки из 30 зданий; наблюдения 23-77 лет с момента постройки).

родской нивелирной сети (всего с 1779 г. было проведено 12 нивелировок). Для того, чтобы свести все нивелировки в одну систему, потребовалось выполнить анализ данных об исходных нивелирных пунктах (не всегда измерения осуществлялись от нуля Кронштадтского футштока), о развитии и трансформации городской нивелирной сети, о современных вертикальных движениях земной коры в региональном плане и пр. Выяснилось, что поднятие территории Санкт-Петербурга, расположенного на периферии Фенноскандии, и подъем уровня Балтийского моря происходят примерно с одинаковой скоростью – порядка 1 мм/год [6].

Осадка свободной, ненагруженной поверхности, на которой установлены фундаментальные реперы, оказалась близкой к нулю (точнее, 0,5 мм за 100 лет).

Самыми старыми сохранившимися знаками оказались геодезические марки нивелировки капитана Савицкого (1872-1874 г. – Рис. 7а). Они сохранились на здании Адмиралтейства, на Зимнем дворце, на Михайловском театре. Существенно больше сохранилось реперов нивелировки проф. Сергиевского (1911 г.) – Рис. 7б.

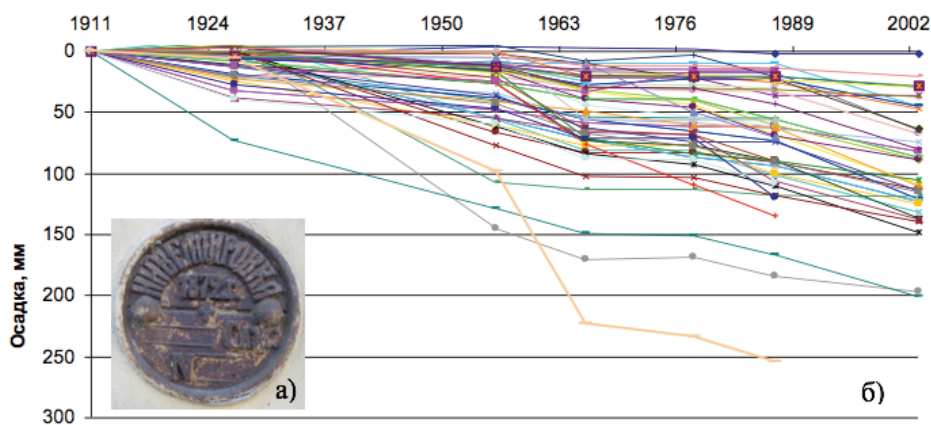


Рис. 5. Геодезическая марка капитана Савицкого, установленная в 1872 г. (а) и осадки во времени нивелирных знаков проф. Сергиевского, установленных в 1911 г. (б).

По данным об осадках 10000 реперов В.А.Васениным была построена геоинформационная система, позволяющая судить об осадках исторической застройки города [2].

Анализ результатов длительных наблюдений за осадками зданий на естественном основании, сложенном водонасыщенными глинистыми грунтами малой и средней степени литификации, позволил сделать следующие выводы:

1. Понятия «конечная осадка» для зданий, возведенных на естественном основании, сложенном слабыми глинистыми грунтами, не существует. Стабилизации осадок зданий исторической застройки не наблюдается на протяжении последних полутора столетий. На смену «первичным» осадкам приходят осадки «вековой ползучести», которые развиваются на протяжении всего срока существования здания.

2. «Первичные» осадки здания развиваются в течение первых двух-трех десятилетий после строительства. В процессе строительства реализуется порядка 30% «первичных» осадок.

3. На этап «вековой ползучести» кривая развития осадок выходит спустя 20-30 лет после возведения здания. Развитие осадок «вековой ползучести» зданий на «спокойной» территории происходит со скоростью 0,5 мм/год, а для зданий, расположенных вдоль набережных, 1,5-2,5 мм/год.

4. Наибольшая интенсивность осадок наблюдается в зонах подработок при устройстве подземных сооружений метрополитена (4-5 мм/год), длительность развития достигает 70 лет.

5. Неравномерность осадок здания со временем увеличивается.

Главным выводом по результатам длительных наблюдений является констатация: определение осадки зданий на слабых глинистых грунтах без учета фактора времени лишено физического смысла. Тем более бессмысленно определять конечную осадку для котлованов, существующих короткое время (от нескольких месяцев до полутора лет).

Результаты длительных наблюдений являются базисом для построения корректных методов расчета осадок зданий и сооружений на слабых глинистых грунтах. Могут строиться различные феноменологические модели – от них требуется системное непротиворечивое и физически осмысленное описание работы грунта, соответствующее данным натурных измерений.

3. Вязкопластическая модель грунта

Как показывает анализ наиболее распространенных моделей грунта [7], основной проблемой большинства моделей является именно описание развития деформаций во времени, причем особенно деформаций формоизменения. Популярная модель Hardening Soil Model, к сожалению, не содержит механизма описания реологических явлений и поэтому неприменима для моделирования процесса развития длительных деформаций ползучести. Практически единственной моделью среди распространенных, пригодной для описания ползучести, является Soft Soil Creep программы Plaxis. Основой этой модели является описание длительных компрессионных испытаний, или так называемой вторичной консолидации. При этом, очевидно, для слабых водонасыщенных грунтов, не меньшее, а скорее, большее значение имеет описание ползучести при сдвиговых деформациях. В модели Soft Soil Creep ползучесть при сдвиге получена как проекция вектора деформации с учетом

ассоциированного закона течения по поверхности эллиптического «шатра» (аналогичного модели Cam Clay). С учетом того, что применимость ассоциированного закона течения к грунтам вообще не вполне обоснована, такое проецирование представляется достаточно механистичным.

В связи с недостатками имеющихся моделей была поставлена задача создания модели, наиболее полно описывающей поведение глинистых грунтов во времени. Основной идеей построения предложенной феноменологической модели поведения грунта является независимое описание деформирования (точнее, применяя терминологию теории пластичности, так называемого деформационного упрочнения или, другими словами, развития области обратимых деформаций) при уплотнении и формоизменении. Параметры объемного сжатия определяются по аппроксимации кривой трехосных консолидировано-дренированных испытаний или из компрессионных опытов. Параметры поведения грунта при сдвиге назначаются из стандартных трехосных испытаний по неконсолидированно-недренированной схеме, в которых для полностью водонасыщенного грунта объемная деформация практически отсутствует и имеют место деформации формоизменения.

По результатам ряда опытов строятся зависимости объемных ϵ_{vp} и сдвиговых γ_p деформаций от объемной составляющей p и девиатора q напряжений. Зависимости $\gamma_p(p, q)$ и $\epsilon_{vp}(p, q)$ можно изобразить на плоскости (p, q) в виде изолиний (Рис. 6).

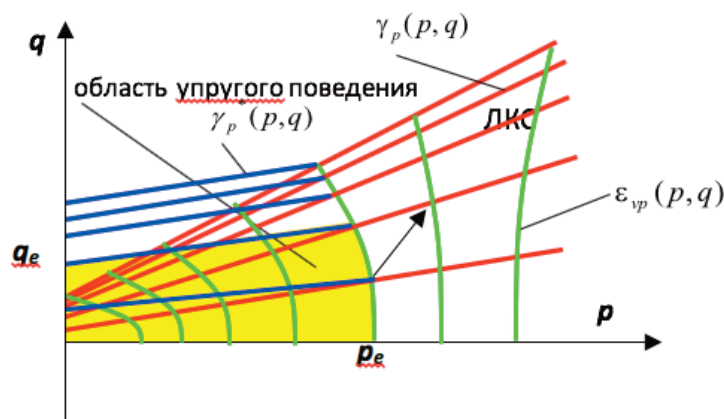


Рис. 6. Схема построения упругопластической модели с независимым деформационным упрочнением программы FEM models.

Подробно математические основы построения модели изложены в [7]. По особенностям работы модель близка к Hardening Soil Model, наиболее существенным отличием является учет деформаций во времени. При описании сдвиговой ползучести используется понятие вязкости, величина которой зависит от уровня действующих напряжений.

Включение в модель реологических уравнений позволяет выполнять более корректное сравнение данных расчетов и наблюдений. Как было показано выше, по результатам наблюдений понятие «конечной осадки» для большинства зданий Санкт-Петербурга не существует и может рассматриваться лишь условно. Поэтому более правильно сравнивать графики развития во времени осадок по результатам наблюдений и по результатам расчетов. Такое сравнение приведено на Рис. 7, на нем изображено сравнение расчетных и наблюдаемых осадок на различные моменты времени для разных зданий из базы данных наблюдений.

Как видно из Рис. 7, сопоставление расчетных и наблюдаемых осадок при использовании разработанной вязкопластической модели существенно улучшается. Однако наибольший интерес имеет именно прогноз развития осадок, когда результат наблюдений еще неизвестен.

Пример прогноза приведен на Рис. 8. В 2006 г. осадка здания по результатам наблюдений составила около 16 см. При этом даже наблюдалось некоторое уменьшение скорости развития осадок, что создавало впечатление стабилизации осадок. Изображенный на Рис. 8, а и б прогноз осадок, казалось, не учитывает эту стабилизацию осадок и существенно завышает их величину (по прогнозу за 40 лет наблюдаемая осадка должна составить 34 см). Однако, как показали дальнейшие наблюдения прогноз оказался достаточно точным (Рис. 9), осадка в 30 см была накоплена зданием уже к 2013 г. (примерно за 10 лет с начала строительства).

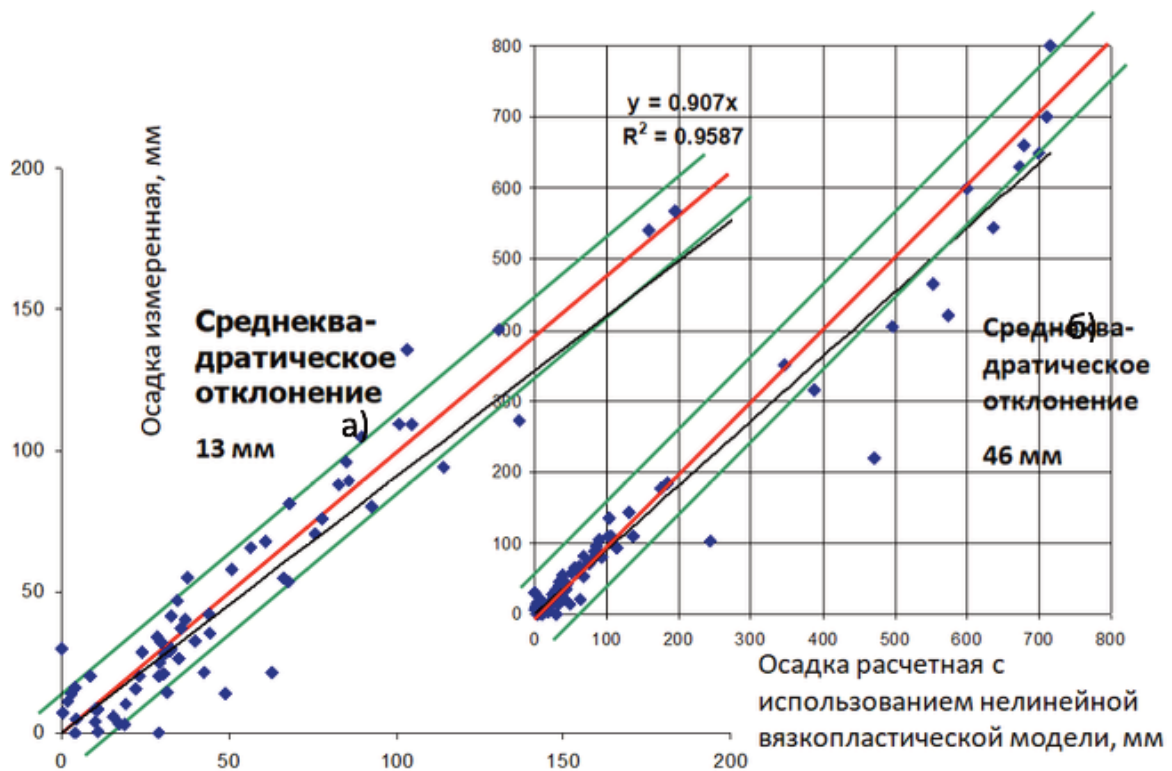


Рис. 7. Сравнение результатов расчетов с использованием упруго-вязко-пластической модели и данных наблюдений: а – выборка для зданий с осадкой до 20 см, б – полная выборка по базе данных наблюдений.

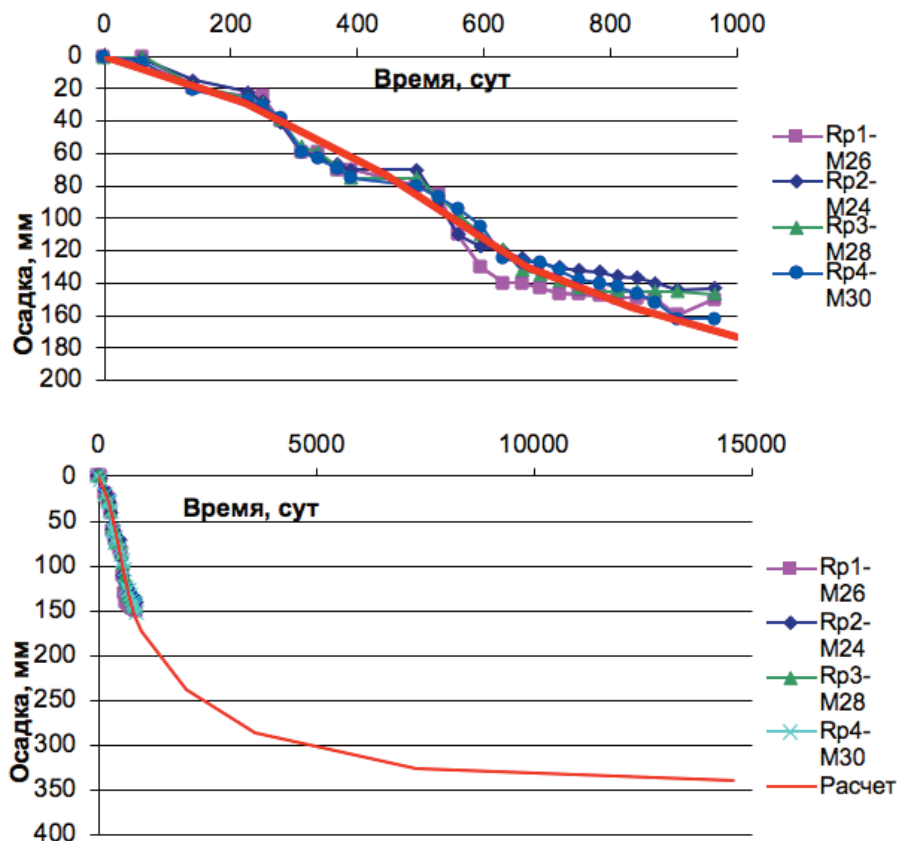


Рис. 8. Пример прогноза осадок здания, выполненный в 2006 г: а – в масштабе 1000 суток (2,7 года), б – в масштабе 15000 суток (41 год).

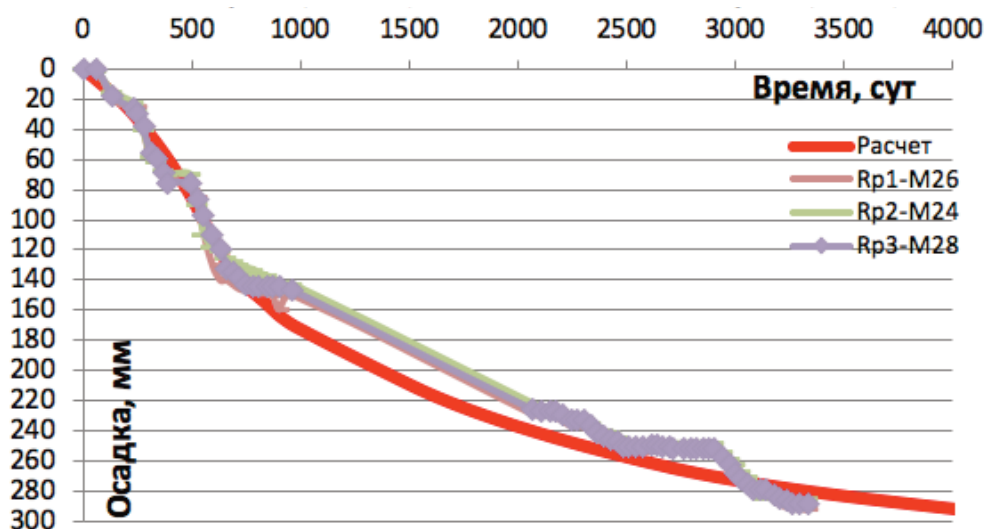


Рис. 9. Сравнение прогноза осадок здания, выполненного в 2006 г. с наблюдениями за зданием до 2013 г.

Выводы

Приведенный пример удачного прогноза осадок является весьма показательным, но не единственным. Разработанная упруго-вязко-пластическая модель достаточно успешно применяется для решения различных геотехнических задач. При этом важным является применение одной и той же модели в разных масштабах времени, например, для моделирования натуральных экспериментов (масштаб времени – часы и дни), устройства котлованов (масштаб времени – недели и месяцы) и осадок зданий (масштаб времени – годы и десятилетия). Способность предсказывать развитие деформаций основывается на длительных исследованиях, включающих сбор базы данных длительных натуральных наблюдений, разработку модели, сопоставление расчетной и наблюдаемой осадки. Без подобных исследований предсказательная способность моделей может оказаться весьма низкой.

Литература

1. Цытович Н.А. *Механика грунтов. Высшая школа, Москва, 1979. 272 с.*
2. Васильев Б.Д. *Возведение капитальных зданий на сильно сжимаемых основаниях: (Опыт фундаментостроения). Госстройиздат, Ленинград, Москва, 1952. 128 с.*
3. Сотников С.Н. *Строительство и реконструкция фундаментов зданий и сооружений на слабых грунтах. Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. МИСИ, Москва, 1987.*
4. Егоров К.Е. *Осадки фундаментов высотных зданий / Сб. статей. К расчету деформаций оснований. НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, Москва, 2002. С. 125-143.*
5. Васенин В.А. *Оценка развития осадок исторической застройки Санкт-Петербурга по результатам наблюдений с конца XIX века. Основания, фундаменты и механика грунтов, № 4, 2013. С. 2-7.*
6. Васенин В.А. *Разработка геоинформационной системы по оценке длительных осадок зданий исторического центра Санкт-Петербурга / Инженерные изыскания, № 10-11, 2016. С. 62-70.*
7. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шашкин В.А. *Основы совместных расчетов зданий и оснований. Изд-во института Геореконструкция, Санкт-Петербург. 2014. 328 с.*

5. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ МАССИВОВ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ

ЗАЩИТНЫЕ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ОСНОВАНИЯ ПОЛИГОНА УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ ПРОМЫШЛЕННО-БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Р.Ф. Абдрахманов

Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН.
450077 г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2. E-mail: hydro@ufaras.ru

В городе ежедневно потребляется огромное количество продукции для удовлетворения нужд населения и потребностей промышленности. В результате образуется большое количество отходов.

Многообразие видов отходов, нестационарность их составов и свойств, широкий диапазон объема образования обуславливает сложность решения проблемы их обработки и утилизации; в результате на многих предприятиях осуществляется неорганизованная эвакуация отходов с использованием существующих систем транспортировки жидких и твердых отходов, образующихся в жилищном и коммунально-бытовом секторах города.

Из всего многообразия отходов, образующихся в городе, основной экологический ущерб наносится промышленными и аналогичными им производственными отходами, среди которых выделяется значительный объем токсичных. Работа выполнена на примере утилизации ТБО г. Уфы под руководством автора.

Свалка расположена в северной части г. Уфы в пределах так называемого «Уфимского полуострова» (Бельско-Уфимская водораздельная равнина). Участок свалки с запада и северо-запада ограничен р. Шугуровка и ее левым притоком руч. Стеглянка, а с востока и юго-востока – руч. Фирсов (левый приток р. Шугуровка). Абсолютные отметки колеблются от 80-85 м (урезы рек Белая и Уфа) до 116-130 м (урезы рек Шугуровка, Стеглянка, Фирсов), 142 м (нижние пруды – накопители промышленных стоков) и 187 м (верхние пруды-накопители). Свалка бытовых отходов находится на отметках 165-171 м.

Городская свалка эксплуатируется с 1962 г., застроена без выполнения защитных мероприятий. Расположена на месте битумных ям АО «Уфимский нефтеперерабатывающий завод». Территория, занимаемая свалкой, составляет около 94 га. Городская свалка условно разделена на 4 зоны: на первую и вторую зоны, где складировались бытовые отходы вперемешку с промышленными отходами, на промышленную зону (третью) завозятся промышленные отходы, четвертая зона – старые захоронения промышленных отходов.

Гидрогеологические условия участка свалки (Рис. 1) изучены до глубины 100-120 м. Характеризуются развитием подземных вод в Q, N, P образованиях. Выполненные исследования на территории свалки показывают, что грунтовые воды имеют сложный химический состав: хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатный, гидрокарбонатно-хлоридный, хлоридный магниевый-кальциевый, кальциевый-натриевый, аммонийно-натриевый. Тип воды (по О.А. Алекину – Е.В. Посохову) изменяется от I (гидрокарбонатного натриевого), II (сульфатного натриевого) до III а (хлормагниевый) и III б (хлоркальциевый), одновременно возрастает минерализация подземных вод от 0,4 до 13,2 г/дм³. При этом увеличивается содержание хлор-иона от 16-44 до 1700-3021 мг/дм³. Отмечены высокие концентрации нитратов (30,3-63,8 мг/дм³), аммония (до 1160 мг/дм³), нефтепродуктов (от 0,04 до 10,4 мг/дм³), фенолов (до 0,3 мг/дм³), бенз/а/пирена (2,7-42,6 нг/дм³), тяжелых металлов, диоксинов. На территории свалки содержание тяжелых металлов в воде колеблется (мг/дм³): меди 0,006-27,9, свинца 0,05-9,4, кадмия 0,0003-1,29, цинка 0,04-63,6, железа от 0,2 до 420,8-2540, марганца 0,05-

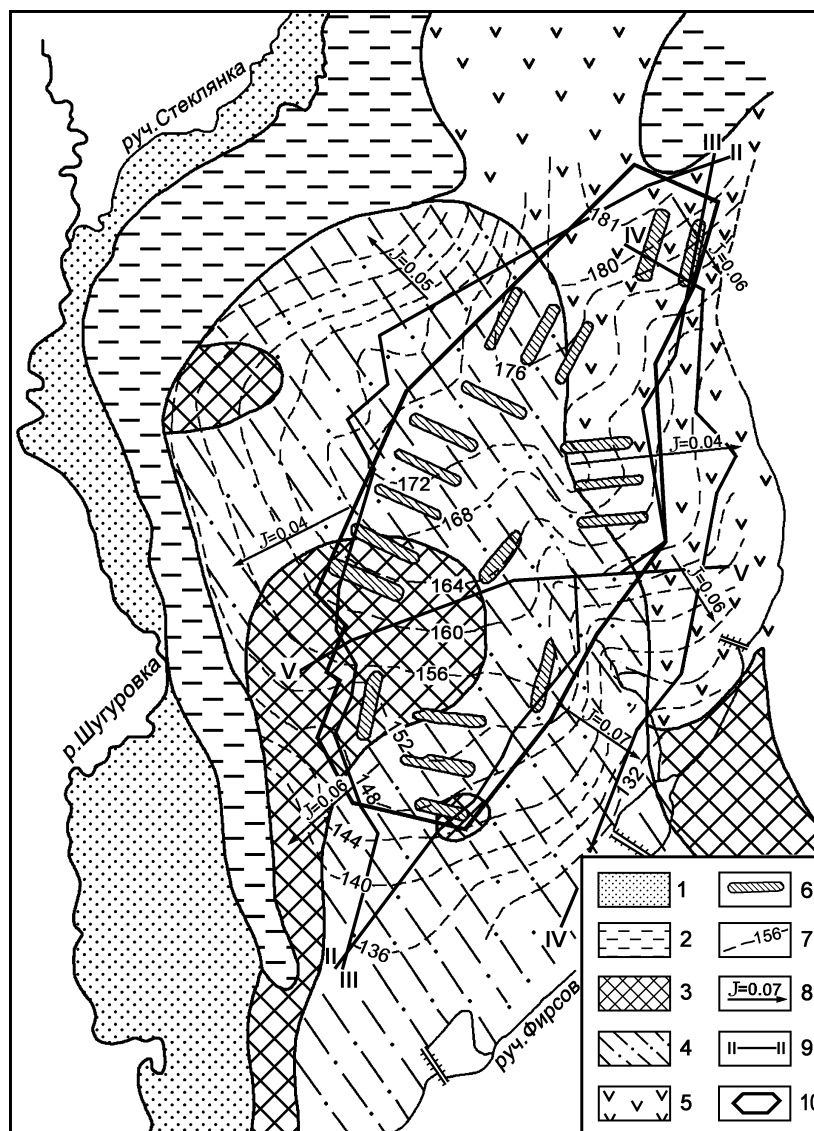


Рис. 1. Карта гидроизогипс и распространения подземных вод в пределах полигона ТБО

1 – водоносный горизонт в аллювиальных четвертичных отложениях; 2 – водоносный комплекс в уфимских отложениях; 3 – воды спорадического распространения в неогеновых отложениях; 4, 5 – грунтовые воды в четвертичных и обшсыртовых отложениях, распространенных: 4 – на неогеновых отложениях, 5 – на уфимских отложениях; 6 – пруды-накопители промышленных сточных вод; 7 – гидроизогипсы (м); 8 – гидравлические уклоны грунтовых вод; 9 – линия гидрогеологического разреза; 10 – граница защитных мероприятий.

31,6, хрома 0,02-15,3. Подвижная часть от общего содержания металлов в среднем составляет (%): Си = 2,0-3,4; Pb до 10; Zn = 2,4-11,0; Cr = 2,6-5,6; Co = 1,5-3,7.

Суммарное содержание диоксинов в грунтовых водах на свалке от 1050 до 18570 пг/дм³ (51-929 ПДК), в том числе 2,3,7,8 ТХДД (полихлорированных дибензо-п-диоксинов) – от 250 до 1450 пг/дм³. Кроме того, суммарное содержание полихлорированных дибензофуранов (ТХДФ) – от 1050 до 6720 пг/дм³, в том числе токсичных 2,3,7,8-ТХДФ от 250 до 900 пг/дм³. Высокие концентрации диоксинов, фенолов, тяжелых металлов отмечаются и в горных породах, заключающих подземные воды. В суглинках и глинах суммарное содержание ТХДФ на глубине 2 м достигают 12330 нг/кг, а наиболее токсичных 2,3,7,8-ТХДД 2530-7540 нг/кг. На глубине 4 м концентрация 2,3,7,8-ТХДД составляет 500 нг/кг, а суммарное содержание ТХДД – 1510 нг/кг. Концентрации металлов изменяется также с глубиной (мг/кг) меди от 9191-500 (глубина 2-3 м) до 46,0 (5 м) и до 28 (16 м), свинца соответственно – 296-18,5, кадмия – 27,78-0,6, ртути – 2,8-0,04 [1].

Анализ соотношения уровней подземных вод в этажнорасположенных горизонтах четвертичного, неогенового и пермского возраста свидетельствует о тенденциях нисходящих перетоков через слабопроницаемые слои, гидрогеологические «окна» преимущественно литолого-фациального происхождения. Величины вертикальных градиентов фильтрации изменяются от 0,1 (южная часть) до

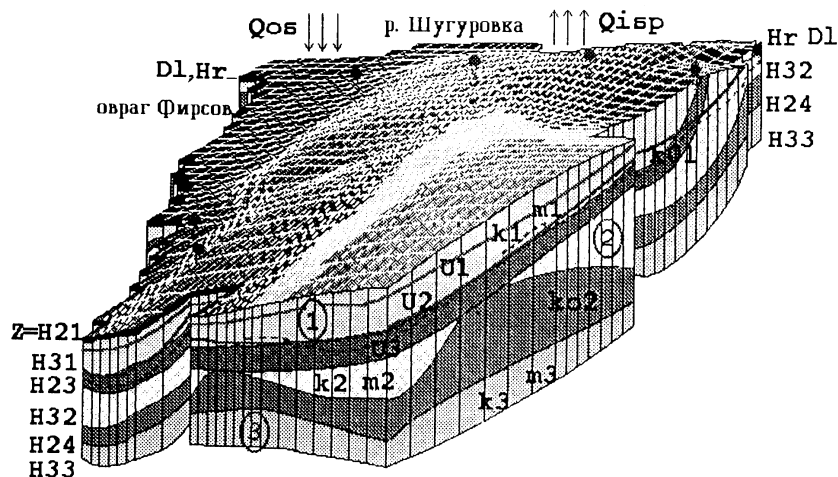


Рис. 2. Натурная модель участка свалки.

1 – водоносный горизонт в отложениях $Q_{3+4}OS_{1+2}$ и Q_2od+m ; 2 – водоносный горизонт в отложениях $N_2^3ak_2$ и P_2u ; 3 – водоносный горизонт в отложениях P_1kg .

1,5–2 (центральная и северная часть).

Вертикальный переток загрязненных грунтовых вод в уфимский водоносный комплекс колеблется от 0,1 до 3,0 м³/сут. Он, в первую очередь, определяется высокими градиентами фильтрации (до 2) и позволяет проникать супертоксикантам на глубину до 100 м, вплоть до регионального водоупора. В подобной ситуации не исключаются дальние латеральные переносы загрязняющих веществ в трещиноватых и закарстованных уфимских и кунгурских отложениях до р. Шугуровка и даже р. Уфа.

Основная часть территории свалки по степени устойчивости и карстовым процессам относится к относительно устойчивым (5 категория: карстовые полости в толще гипсов отсутствуют, глубина залегания кровли карстующихся пород более 60 м, слабая изрезанность кровли и др.). Обрамляющие свалку участки (см. рис. 1) относятся к категории несколько пониженной устойчивости (4 категория). На склонах долин рек Шугуровка, Стеглянка, Фирсов выделяются небольшие участки, относящиеся к категориям недостаточной устойчивости, неустойчивой и очень неустойчивой (III, II, I категории).

Для разработки системы защитных мероприятий с целью предотвращения загрязнения подземных и поверхностных вод (р. Уфа, где расположен основной городской водозабор для южной части г. Уфы) разработана математическая модель Уфимской городской свалки (рис. 2). Природно-техногенная геофильтрационная система свалки представляет собой совокупность параметрически интерпретированных метеорологических, гидрологических и гидрогеологических условий, направленности взаимосвязи поверхностных и грунтовых вод и их испарения, взаимодействие которых приводит к соответствующим уровенному, гидродинамическому и водобалансовому режимам [1].

Не останавливаясь на деталях модели, отметим только, что результаты математического моделирования позволили разработать систему защитных мероприятий для предотвращения загрязнения подземных и поверхностных вод, которая включает два вида дренажа: горизонтальный и вертикальный (рис. 3).

Горизонтальный дренаж (по контуру свалки) необходим для предотвращения растекания загрязненных грунтовых вод за пределы территории свалки. В то же время, горизонтальные дрены, расположенные кольцом вокруг свалки, не исключают вертикальную фильтрацию, а, следовательно, загрязнение нижележащих водоносных горизонтов. Суммарный переток грунтовых вод 1%-ой обеспеченности в нижележащие водоносные горизонты в пределах территории свалки без защитных мероприятий и при работе горизонтального дренажа соответственно составляет 101 м³/сут и 88 м³/сут.

Вертикальный дренаж предлагается для исключения транзитного растекания за пределы территории свалки вод уфимского комплекса, загрязненных вследствие вертикальной фильтрации грунтовых вод. Вертикальные дренажные скважины, размещенные за контуром свалки, исключают растекание загрязненных подземных вод за пределы свалки путем формирования депрессионной воронки в уфимском водоносном комплексе.

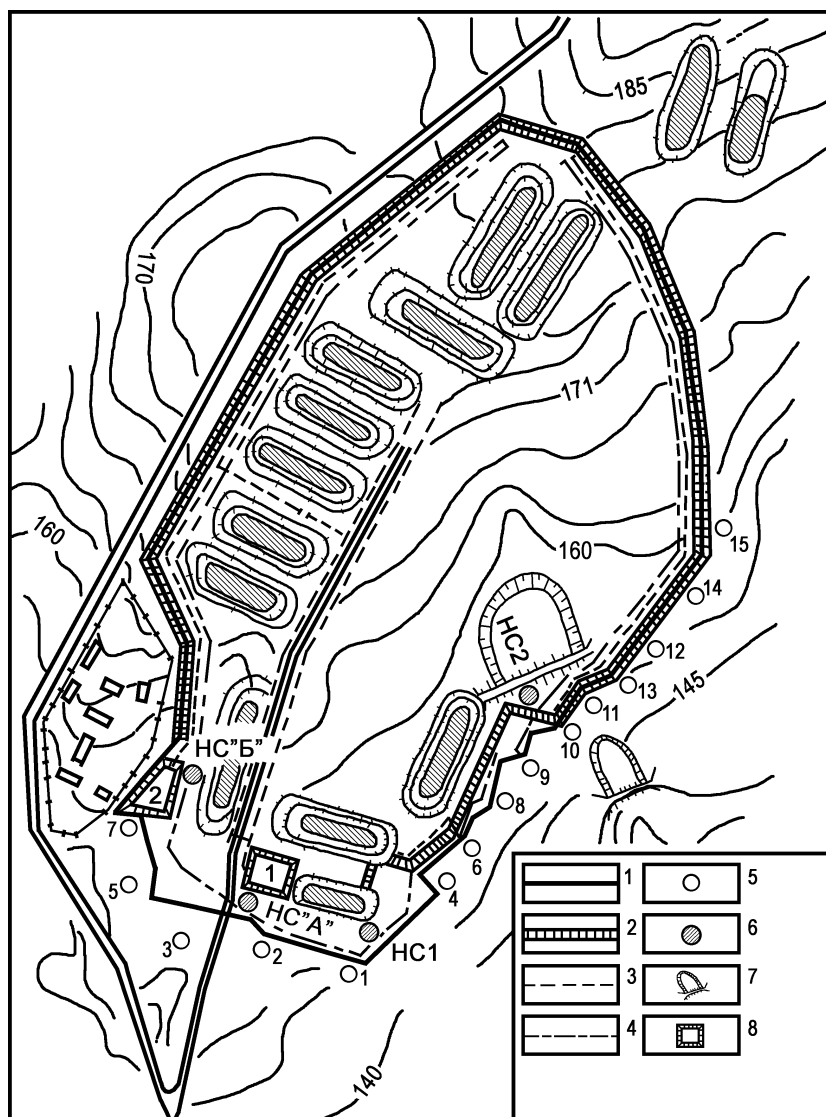


Рис. 3. Инженерные сооружения перехвата сточных вод.

1 – противофильтрационный экран; 2 – дамба обвалования; 3 – открытая ливневая сеть; 4 – горизонтальный трубчатый дренаж; 5 – вертикальный дренаж; 6 – насосные станции; 7 – существующие пруды-накопители; 8 – проектируемые пруды-накопители.

Проектируемые дренажные скважины должны работать с постоянным напором, либо с постоянным дебитом. В начале работы они распределяются во всех блоках по контуру свалки. Скважины, в которых отсутствует водоприток за счет взаимовлияния формирующихся вокруг них депрессионных воронок, перестают работать и программным способом отключаются. При достижении установившегося геофильтрационного режима места размещения и количество оставшихся скважин принимается в качестве оптимизированных, а расходы оцениваются как стабильно гарантированные. Оценка эффективности защиты подземных и поверхностных вод от загрязняющего влияния свалки производится:

- а) при работе горизонтального дренажа;
- б) при работе вертикального «кольцевого» дренажа.

Оценка эффективности горизонтального дренажа в P_1 водоносном горизонте производится для горизонтального совершенного дренажа, проложенного по контуру свалки и прорезающего четвертичный водоносный горизонт с частичным углублением в водоупорную толщу.

Абсолютные отметки уровней грунтовых вод 1%-ой обеспеченности на прилегающей в свалке территории и на самой свалке колеблются от 120 до 195 м. Направление потока грунтовых вод 1%-ой обеспеченности практически совпадает с рельефом местности.

Сработка уровня грунтовых вод 1%-ой обеспеченности в динамике изменения режимобразующих факторов при работе горизонтального дренажа в течение одного года составляет 1 м в центре

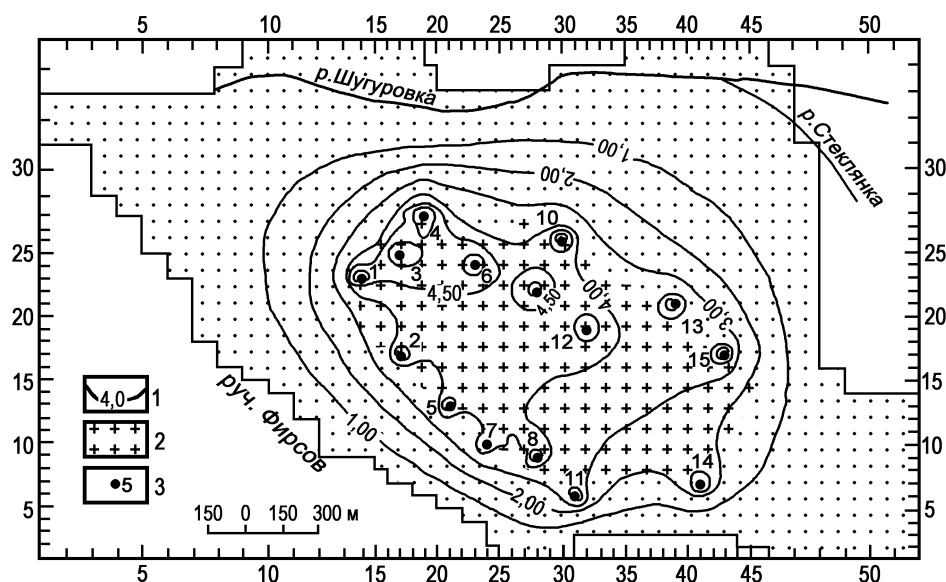


Рис. 4. Карта сработки уровня подземных вод 1%-ой обеспеченности в уфимском водоносном комплексе при работе вертикального кольцевого дренажа.

1 – изолинии понижения уровня; 2 – территория свалки; 3 – проектируемая дренажная скважина с заданным напором.

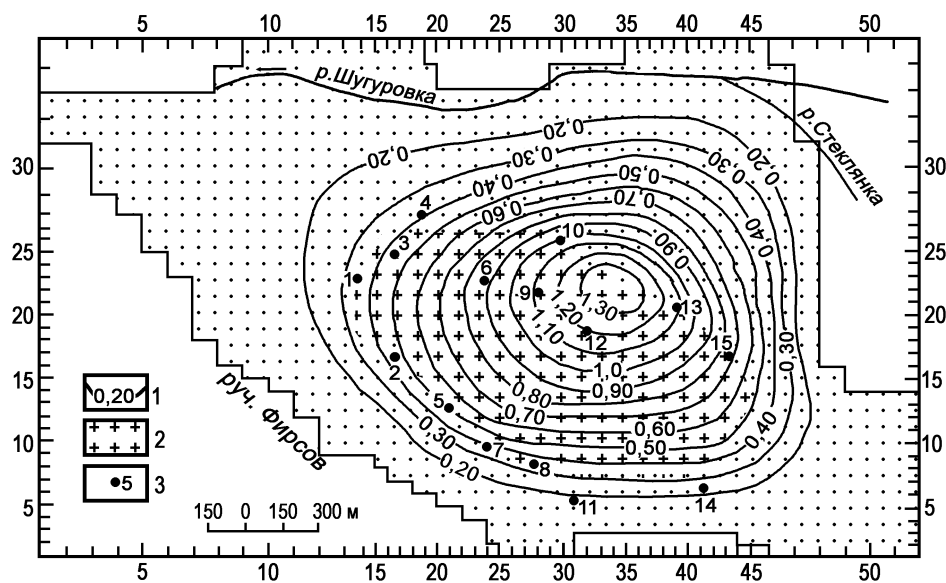


Рис. 5. Карта сработки уровня подземных вод 1%-ой обеспеченности в кунгурском водоносном горизонте при работе вертикального кольцевого дренажа.

1 – изолинии понижения уровня; 2 – территория свалки; 3 – проектируемая дренажная скважина с заданным напором.

свалки и до 7 м вблизи горизонтальных дрен. Суточный расход воды по всему горизонтальному дренажу в период атмосферных осадков 1%-ой обеспеченности (без «ливневки») составляет 1495 м³/сут.

Данная схема дренажа исключает транзитное растекание грунтовых вод за пределы территории свалки, что предотвращает загрязнение грунтовых и поверхностных вод за контуром свалки.

Суммарный переток грунтовых вод 1%-ой обеспеченности в нижележащие водоносные горизонты при работе горизонтального дренажа снизится до 88 м³/сут.

Оценка эффективности вертикального «кольцевого» дренажа производится для дренажной системы, состоящей из 15 скважин с суммарным дебитом 2290 м³/сут, расположенных кольцом, охватывающим городскую свалку (рис. 4).

Мощность перекрывающего их водоупора колеблется от 6,0 до 71,0 м. Абсолютные отметки уровня подземных вод 1%-ой обеспеченности уфимского водоносного комплекса под

самой свалкой и прилегающих территориях составят от 112,0 до 176,0 м, кунгурского – 104,0–167,0 м.

Расчеты параметров дренажных скважин производятся при заданном напоре на каждую скважину. При данных параметрах и местоположениях скважин достигается:

а) исключение транзитного растекания за пределы территории свалки подземных вод уфимских отложений, загрязненных вследствие нисходящей вертикальной фильтрации грунтовых вод;

б) формирование депрессионной воронки в уфимском водоносном комплексе и установление в пределах ее напоров ниже напоров подземных вод кунгурского яруса (рис. 5). Понижение уровня подземных вод уфимского яруса под свалкой составит 2–5 м, кунгурского яруса – 0,35–1,4 м.

Недостатками данной схемы дренажа являются:

а) скважины для эффективной работы данной схемы должны работать с повышенной производительностью. При соответствующих фильтрационных свойствах горизонта это трудно осуществимо (необходимо бурить скважины большого диаметра);

б) дополнительное увеличение притока «чистой» воды с сопредельного севера и северо-запада увеличит нагрузку на очистные сооружения.

Реализация данного проекта позволит в значительной степени уменьшить техногенную нагрузку на экологическое состояние подземных вод бассейнов р. Шугуровки и, в конечном счете, нижнего течения р. Уфы, где расположен один из основных инфильтрационных водозаборов г. Уфы.

Работа выполнена по теме FMRS-2022-0013.

Литература

1. Абдрахманов Р.Ф. *Гидрогеоэкология Башкортостана. Уфа: Информреклама. 2005. 344 с.*
2. Федоров Л.А. *Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы. М.: Наука. 1993. 266 с.*

ИСКУССТВЕННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СЛАБЫХ ГРУНТОВ

Т.Т. Абрамова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, геологический факультет. E-mail: attoma@mail.ru

Последние 10-20 лет ознаменовались появлением на российском строительном рынке большого количества геотехнических фирм (как отечественных, так и зарубежных). Развитие буросмесительной технологии на базе современного оборудования позволило по-новому взглянуть на искусственное преобразование слабых грунтов с ее помощью, так как современное строительство остро нуждается в способах преобразования грунтов в условиях их естественного залегания. Эта технология не нова, ее разработкой занимались еще в пятидесятые годы прошлого столетия в Скандинавских странах, США, Японии и нашей стране.

В СССР эта технология нашла применение при строительстве портовых сооружений (закрепление морских илистых оснований). Однако она широко не использовалась в связи с невысоким уровнем оборудования. А зарубежные компании успешно ее применяли. В связи с этим, основные научные исследования, связанные с изучением технологии перемешивания грунтов в различных инженерно-геологических условиях производились западными учеными (Van Impe, M. Topolnicki, В.Н. Jasperse, J. Jacobson и др.). В СССР большой вклад в развитие технологии перемешивания грунтов внесли В.М. Безрук, В.Е. Соколович, Э.В. Мокс, А.Н. Токин, А.В. Шапошников и др.

Многообразие инженерно-геологических, природно-климатических факторов на территории России требовало всестороннего обобщения теоретических и практических исследований по закреплению широкого спектра слабых грунтов (от песков до илов и торфов) с помощью буросмесительной технологии.

В настоящее время глубинное смешивание (DSM) классифицируется по виду используемого вяжущего (цемент, известь, гипс, зола, шлак и т.д.) и методу смешивания (мокрое или сухое, вращение или гидравлическое погружение, шнек или лопасть), выбор которых зависит от грунтовых условий и спецификации проекта. Метод сухого перемешивания (Dry mixing) используется в грунтах с достаточным содержанием влаги, чтобы обеспечить химическую реакцию сухого вяжущего с грунтом. Таким образом, этот метод позволяет уменьшить содержание воды в грунте. К основным преимуществам сухого перемешивания относятся: возможность работы при низких температурах, стабилизация очень слабых грунтов (в том числе и органических), низкая цена и очень большая продуктивность. Метод мокрого перемешивания (Wet mixing), при котором вяжущее подается в растворе, дает возможность устройства грунтоцементных элементов на глубине более 30 м с использованием различных грунтов от слабых глин до средней плотности песка и гравия с включениями булыжников. Этот метод наиболее популярен в России. Его преимущество заключается в экономии материала-заполнителя, так как слабый грунт не удаляется, а только смешивается с вяжущим раствором.

Спецификой буросмесительной технологии является то, что с помощью специального оборудования (без значительной вибрации) выполняется разрыхление грунта непосредственно в массиве без его извлечения. Одновременно в грунт нагнетают вяжущие, перемешивают и уплотняют грунтоцементную смесь. Все технологические операции разрыхления грунта и подачи цементирующего раствора должны обеспечивать однородность смеси, чтобы исключить участки необработанного грунта. В результате образуются цилиндрические грунтоцементные элементы диаметром 0,3–0,8 м и длиной до 20–40 м. Технологический режим может предусматривать несколько циклов поднятия-опускания смесителя с непрерывным вращением.

Для закрепления грунтов применяют портландцемент стандартных марок (М 400, М 500). В зависимости от влажности закрепляемых грунтов цемент перемешивается в сухом виде или в виде раствора. Укрепление дисперсных грунтов цементом обуславливается тем, что продукты гидратации и гидролиза цемента взаимодействуют с любой поверхностью минеральных частиц грунта, коагулируют, агрегируют наиболее дисперсную его часть и в процессе своего роста и кристаллизации образуют прочную коагуляционно-кристаллизационную структуру грунтоцемента. На кинетику гидратации цемента и процессы структурообразования грунтоцемента оказывают наибольшее влияние следующие группы факторов:

- зависящие от состава и свойств грунтов: а) гранулометрический состав, б) химико-минеральный состав, в) структурно-текстурные особенности, г) емкость поглощения и состав обменных катионов, рН и др.;

- зависящие от состава и свойств цемента: а) химико-минеральный состав, б) тонкость помола, активность цемента, в) различные активные добавки к цементу;

- технологического порядка: а) влажность структурообразования грунтоцемента, б) характер и нагрузка уплотнения, в) режим твердения грунтоцемента (влажность и температура).

Обширные исследования в области возможности и эффективности закрепления связных грунтов цементами в нашей стране проводились В.М. Безруком [2]. Было установлено, что степень пригодности грунтов для упрочнения их цементами в первую очередь зависит от минерального и дисперсного состава. Степень дисперсности первичных минералов оказывает большое влияние на увеличение силы сцепления, связности и прочности при их цементации, т.е. с увеличением поверхности и поверхностной энергии у цементированных первичных полидисперсных минералов прочность увеличивается.

Для глинистых грунтов основным показателем пригодности является минеральный состав, а именно, количественное содержание минералов группы монтмориллонита. Подвижность кристаллической решетки монтмориллонита и его большая емкость поглощения в отличие от неподвижной кристаллической решетки у каолинита и его малой емкости поглощения резко сказывается на прочностных характеристиках грунтов. Монтмориллонит не дает прочной системы при его цементации малыми добавками цемента. Поэтому тяжелые суглинки, тощие и жирные глины с большим преобладанием минералов группы монтмориллонита (другие минералы содержатся в небольшом количестве), являются мало- и непригодными для закрепления цементами. В связи с этим, для водонасыщенных глинистых грунтов в качестве вяжущего наиболее перспективной является известь. В этом случае глинистые грунты набирают прочность медленнее из-за длительности процессов кристаллизации гидроксида кальция и карбонатизации породы.

Для заболоченных мест и грунтов с повышенной влажностью в качестве вяжущего может применяться негашеная известь в сухом виде, которая при взаимодействии с водой превращается в гашеную. Также возможно применение смеси цемента и извести в определенных пропорциях. В отдельных случаях в качестве вяжущего могут быть применены доменные шлаки, золы уноса или шлакопортландцемент. В качестве добавок при упрочнении цементом тяжелых глин и суглинков, гумусированных грунтов и черноземов используют хлорное железо или серноокисное железо. Для ускорения твердения, повышения прочности и водонепроницаемости грунтоцемента в раствор вводят различные добавки: ускорители, пластификаторы (типа ССБ, С-3, СДБ, ГКЖ-10, -11, -94, полиизоцианат, нефелиновый гудрон и др.), гидрофобизаторы. Количество и вид вяжущего подбирается в лабораторных условиях, затем корректируется полевыми испытаниями. Введение пластификаторов в грунт повышает прочность грунтоцемента, а также улучшает механическое перемешивание глинистых грунтов с вяжущим за счет разрушения их структурных связей.

Для закрепления заторфованных и заиленных грунтов финскими специалистами рекомендуется применение смеси вяжущих из извести, цемента, гипса и различных шлаков. На основании проведенных исследований ими была составлена таблица степени пригодности вида вяжущего для тех или иных грунтов [10].

Для обработки вяжущими предпочтение следует отдавать карбонатным грунтам, которые приобретают после укрепления более высокую прочность по сравнению с некарбонатными разновидностями. Засоленные грунты, содержащие 4–6% солей (за исключением сульфатного засоления), допускается укреплять портландцементом совместно с добавками извести и хлористого кальция, хлорного или серноокислого железа [9].

Одним из определяющих факторов прочностных свойств грунтоцемента является содержание цемента в единице объема закрепляемого грунта. Результаты изменения прочности грунтоцемента в зависимости от дозировок цемента и вида грунта достаточно ярко отражены в работе С.В. Ланько [4]. Увеличение дозировок цемента со 150 до 500 кг/м³ приводит к повышению прочности грунтоцемента на 70 – 90%.

Прочностные характеристики грунты приобретают в начальный период их твердения. Исследования, проведенные большим количеством ученых, выявили, что прочность различных грунтов,

закрепленных с помощью глубинного перемешивания, колеблется в пределах 1 – 20 МПа в зависимости от их состава, свойств, дозировок вяжущего и времени твердения грунтоцемента.

Повышение температуры и влажности ускоряют процесс твердения. Например, при влажности грунтоцемента 29,0 – 29,2% прочность на одноосное сжатие при содержании цемента 5% соответствует 1,0 МПа (модуль деформации 134,7 МПа) и возрастает до 13,8 МПа (модуль деформации 942 МПа) с увеличением содержания цемента до 50% при твердении образцов в водных условиях 90 суток. Причем прочность закрепленных грунтов и модуль деформации при водном хранении увеличиваются в два раза по сравнению со значениями 28-суточного хранения. Факт длительного твердения грунтоцемента во влажных условиях установлен многими исследователями. Это доказывает целесообразность использования грунтоцемента в подземных конструкциях при достаточно высоком уровне грунтовых вод.

Высокая водонепроницаемость грунтоцемента (марка W14) [3] и коррозионная стойкость к агрессивным средам ($K_c \approx 0,8$) [8] позволили использовать его как гидроизоляционный материал при устройстве подземных хранилищ химически агрессивных и токсичных отходов.

В настоящее время достаточно широко стала применяться разновидность буросмесительной технологии – Mass Stabilisation (объемная стабилизация). Данная разработка также предлагает введение вяжущих веществ непосредственно в стабилизируемую массу грунта с эффективным их перемешиванием до равномерного закрепления. Закрепление грунта производится на глубину не более 7 м. Вяжущее (цемент, известь, шлаки, золы уноса, гипс) используется только в сухом состоянии с той целью, чтобы смесь была в «пластичном» или «твердопластичном» состоянии.

Инновационным решением объемной стабилизации является осуществление строительства на непрочных грунтах, где фундаменты сооружений устраиваются под водой, в поймах рек, где подвижный грунт и болотистая почва.

Расход вяжущего варьируется от 70 до 200 кг/м³ в зависимости от типа грунтов и решаемой задачи. Спектр задач, решаемых с помощью этой технологии, обширен. Наиболее часто объемная стабилизация применяется в дорожном и малоэтажном строительстве. Одним из вариантов ее использования является захоронение вредных отходов, когда загрязненный грунт обрабатывается специальными реагентами, которые герметизируют опасные вещества.

Преобразование слабых водонасыщенных грунтов связано со значительными сложностями, что и предопределяет необходимость проведения оперативного контроля эффективности работ по буросмесительной технологии. Контроль качества выполняемых работ для этой технологии осуществляется на всех этапах преобразования грунтов. Методы обеспечения и контроля качества для «сухого» и «мокрого» перемешивания имеют ряд особенностей, связанных, главным образом, с прочностью грунтоцемента. В первом случае наиболее часто используется зондирование, а для второго – разрушающие методы (стандартные кубики и керны). Кроме контроля проектных значений разрушающими методами, можно использовать и геофизические.

Изменения физико-механических свойств искусственно преобразованного грунтового массива можно продемонстрировать с помощью значений скорости распространения упругих волн. Исследования К.Р. Массарша [5] известково-цементных колонн, изготовленных по технологии DSM (сухое перемешивание), показали, что модуль сдвига увеличивается во времени после преобразования пластичной глины с высоким содержанием органики. Через 41 день после устройства колонн скорость волны сдвига возрастает с 40 м/с до 310 м/с и в дальнейшем до 360 м/с. Максимальная величина модуля сдвига для закрепленного грунта при сдвиговой деформации 0,001% составила 255 МПа.

Наиболее важным параметром, определяющим взаимосвязь между модулем сдвига при малых деформациях (и скоростью распространения поперечных волн) и сопротивлением недренированному сдвигу, является естественное содержание воды (степень заполнения пор водой). Нормализованный модуль сдвига существенно уменьшается, когда содержание воды в порах грунта увеличивается.

Влияние плотности образцов грунтоцемента, полученного буросмесительным способом, влажности и дополнительной нагрузки на скорость упругих поперечных (V_p) волн было изучено Е.С. Соболевым, А.З. Тер-Мартirosяном, Д.С. Моревым [6] методом малоамплитудных крутильных колебаний в резонансной колонке в режиме анизотропного трехосного сжатия. В лабораторных условиях были исследованы закрепленные образцы грунта в широком диапазоне влажностей от 0,0 д. ед. до полного водонасыщения.

В результате исследований авторами зафиксировано, что с увеличением плотности образцов грунтоцемента, отобранных из закрепленного основания сооружения, от 0,96 до 1,60 г/см³ скорость упругих поперечных волн снижается с 663 до 493 м/с. Так же показано, что с ростом влажности закрепленных образцов скорость поперечных волн уменьшается. Увеличение влажности грунтоцемента от воздушно-сухого состояния ($W \approx 0,05$ д. ед.) приводит к уменьшению скорости упругих волн на 20%, с 609 до 507 м/с.

Исследования Д.А. Абрамова, Р.Р. Юсупова, А.А. Вольфа и др. [1] также показали, что чем выше насыщенность породы жидкостью, тем больше снижается скорость поперечной волны. Скорость поперечной волны уменьшается и при наличии в породе рассеянных глинистых минералов, не влияющих на жесткость, но уменьшающих эффективную пористость. В передаче поперечной волны большую роль играет тип межзерновых контактов, так как деформация передается только через контакты зерен породы, а поры остаются свободными от цементирующего вещества.

В большинстве случаев преобразование строительных свойств грунтов методом глубинного перемешивания применяется для улучшения работы основания при статических нагрузках. При возведении особо сложных и тяжелых сооружений существенно изменяется напряженное состояние основания, возникает анизотропное. В связи с этим основной задачей исследований А.З. Тер-Мартirosяна, Е.С. Соболева явилось выявление зависимости между вертикальными напряжениями и скоростью поперечных волн (V_s) в режиме анизотропного трехосного сжатия [7].

Анализ полученных результатов показал, что чем выше вертикальное напряжение σ , тем больше скорость поперечных волн. Так, при боковом давлении $\sigma_3 = 100$ кПа увеличение вертикального напряжения σ в 7 раз приводит к росту скорости V_s на 15% (по средним значениям от 515 до 608 м/с).

Выявлена общая тенденция: чем меньше было исходное боковое давление σ_3 , тем больше прирост скорости поперечных волн V_s в процессе анизотропного трехосного сжатия в резонансной колонке. Так, при боковом давлении $\sigma_3 = 40$ кПа $V_s = 424$ м/с, а при $\sigma_3 = 280$ кПа скорость $V_s = 542$ м/с.

Многочисленные исследования показали, что глубинное смешивание грунтов позволяет обеспечить решение проблем, касающихся следующего:

- повышение прочности грунтового основания на грунтах естественного залегания;
- укрепление откосов и котлованов в стесненных городских условиях;
- обеспечение динамической устойчивости грунтов естественного залегания (в сейсмоактивных регионах);
- устройство водонепроницаемых экранов из грунтоцемента при захоронении бытовых, химических и других отходов.

Буромесительная технология достаточно широко используется как за рубежом, так и в России. В качестве примеров рассмотрим лишь несколько.

1. Усиление основания фундамента резервуара РВСН-2000 в районе с. Августовка Одесской области (сейсмическая интенсивность участка 8 баллов) осуществлялось с помощью грунтоцементных колонн с целью снижения влияния динамических нагрузок на подземную часть сооружения. На глубине 7 м от поверхности земли залегают текучие суглинки и супеси, модуль деформации колеблется в пределах $E = 3 \dots 5$ МПа. Проведенные работы позволили увеличить модуль упругости (деформации), прочность основания и снизить сейсмическую опасность. Скорость сейсмических волн увеличилась до 800 м/с.

2. Усиление грунтового основания фундаментной плиты многоэтажного здания в г. Краснодаре (сейсмичность площадки соответствовала 7 баллам) с помощью буромесительной технологии было вызвано наличием в сжимаемой толще слабых грунтов, суглинков мягко- и текучепластичной консистенции. Устройство искусственного основания осуществлялось грунтоцементными колоннами диаметром 1050 – 1100 см, длиной до 9 м при проведении постоянного технического мониторинга.

3. Данный метод был применен при возведении сооружений в порту г. Темрюк (сейсмичность 8 баллов и наличие грязевых вулканов) в 18-метровой толще илов, иловатых суглинков и глин с модулем общей деформации от 3 до 4 МПа. В качестве вяжущего использовался сульфатостойкий цемент марки 500 с обычной тонкостью помола. Полученные результаты показали: несущая способность свай достигает 11 тс, модуль деформации армированного грунта 50-55 кгс/см², материал грунтоцементных свай имеет плотность 1,67-1,89 г/см³, прочность на одноосное сжатие 0,6-12 кг/см², модуль деформации 8,0-82,6 кг/см².

4. Буросмесительный способ оказался наиболее экономичным и технологически подходящим вариантом по сравнению со струйной технологией для закрепления глинистых грунтов в текучем состоянии с прослойками песка, строительного мусора мощностью 3,6-5,0 м и озерно-аллювиальных отложений, суглинка мягко- и тугопластичного для усиления фундаментов на Архангельском целлюлозно-бумажном комбинате.

Примеров использования массовой стабилизации особенно много за границей. Это упрочнение глин и торфов в Ирландии и Испании. Наиболее широко она применяется в Финляндии. Только около 500000 м³ зараженных трибутилом донных осадков было стабилизировано в Бухте Вуосаари (Хельсинки). Сейчас и в России используют эту технологию. Это стабилизация грунтов на таких крупных объектах, как газопровод «Северный поток» ОАО «Газпром», а также подготовка территорий для ЖК «Юнтолово» (Санкт-Петербург).

В заключение можно отметить, что равномерное распределение вяжущего в грунте создает возможность наиболее полного прохождения химических реакций гидратации и гидролиза цемента.

Механические характеристики грунтоцемента зависят от: состава, свойств грунтов (гранулометрический, химико-минеральный составы, структурно-текстурные особенности) и вяжущих, количества вводимых компонентов (цемента, воды и др.).

Применение данной технологии наиболее эффективно в неблагоприятных инженерно-геологических условиях, в условиях сильного обводнения грунтов, что значительно расширяет фронт ее воздействия на структурно-неустойчивые грунты (пльвуны, илы, просадочные лессы и др.).

Отличительной ее особенностью от других глубинных технологий является высокая водонепроницаемость и химическая стойкость искусственного грунтоцементного материала. Таким образом, возможно защитить окружающую среду от свалок, растекания нефти и других химических веществ.

Отсутствие сильных вибраций свидетельствует о том, что она может применяться в местах с высокой концентрацией построек и в жилых районах.

Контроль качества выполняемых работ по глубинному смешиванию необходимо осуществлять на всех стадиях преобразования грунтов. В качестве системы раннего предупреждения разрушения в грунтоцементе может быть использована скорость сдвиговых волн. Наиболее важным параметром, определяющим взаимосвязь между модулем сдвига при малых деформациях и сопротивлением недренированному сдвигу, является степень заполнения пор водой в грунтоцементе.

Продемонстрировано, что при полном насыщении образцов водой скорость поперечных волн снижается на 20%.

Испытание грунтоцемента в условиях трехосного сжатия позволяет оценить влияние боковых напряжений на их прочностные и деформационные свойства.

Использование буросмесительной технологии способствует увеличению динамической устойчивости преобразованных грунтов естественного залегания, включая сейсмоактивные регионы страны.

Литература

1. Абрамов Д.А., Юсупов Р.Р., Вольф А.А. и др. Упругие волны в горных породах и влияние различных факторов на их скорости // *Молодой ученый*, 2018, № 44 (230), с. 229-232.
2. Безрук В.М. *Теоретические основы укрепления грунтов цементами*. М., Автостройиздат, 1956.
3. Вагидов М.М., Зоценко Н.Л. *Грунтоцементные основания и фундаменты* // *Вестник Дагестанского государственного технического университета*, 2012, № 26, с. 94-102.
4. Ланько С.В. *Современные технологии перемешивания грунтов* // *Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции: сб. трудов н-тех. конф., С-Пб, 2010, с. 168-174.*
5. Массарш К.Р. *Деформационные свойства стабилизированных грунтовых колонн* // *Развитие городов и геотехническое строительство*, 2006, № 10, с. 158-175.
6. Соболев Е.С., Тер-Мартirosян А.З., Морев Д.С. *Экспериментальные исследования скоростей упругих поперечных волн в грунтоцементе в зависимости от плотности, влажности и напряженного состояния* // *Геотехника*, 2019, Том XI, № 3, с. 6-12.
7. Тер-Мартirosян А.З., Соболев Е.С. *Исследование скорости поперечных волн в грунтоцементе при анизотропном напряженном состоянии* // *Вестник МГСУ*, 2020, Том 15, Вып. 10, с. 1372-1389.

8. Тимофеева К.А. Застосування ґрунтоцементу як протифільтраційного екрану амбарів-шламонакопичувачів для відходів буріння та експлуатації нафтогазових свердловин // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування будівництво), вип. 4 (34), Полтава: ПолтНТУ, 2012, с. 67-70
9. Якобсон М.Я., Введенская А.С., Кузнецова А.А., Бычков А.В., Калиновская Н.А., Mai A., Merz T. Технологические особенности производства и контроля при строительстве оснований из ґрунтов, укрепленных цементом // Системные технологии, 2016, № 18, с.126-132
10. *Mass Stabilisation Manual*. – ALLU, Finland, 2009.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКОЛОГО-ГИГИЕНИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ЛИКВИДИРОВАННЫХ ШАХТНЫХ ПУСКОВЫХ УСТАНОВОК В ПЕРМСКОМ КРАЕ

Г.М. Батракова¹, Н.Н. Слюсарь¹, А.В. Тарабара²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614990, Комсомольский пр., 29, г.Пермь. E-mail: eco@pstu.ru

²ООО «ЭкоРК», Б. Тишинский пер., 43, г.Москва. E-mail: rosptk@yandex.ru.

Пермский край являлся одной из многих территорий бывшего Советского Союза, где дислоцировались пусковые установки боевых ракетных комплексов межконтинентальных баллистических ракет (МБР) [1]. После вывода из эксплуатации МБР шахтного базирования долгое время не решался вопрос ликвидации шахтных пусковых установок (ШПУ) группового и одиночного расположения.

До конца 1990х гг. ликвидация пусковых установок включала подрыв без выполнения надлежащей рекультивации. В течение последующих лет брошенные площадки приходили в запустение, подвергались естественному и целенаправленному разрушению. Транспортная доступность к площадкам обусловлена хорошим состоянием подъездных дорог. Следует отметить, что населением в целом осознавалась опасность доступа к бывшим военным объектам. Потенциальную опасность площадок ШПУ связывали с наличием открытых или затопленных устьев шахт, полуразрушенных заглубленных и наземных сооружений, разбросанными на большой территории остатками железобетонных конструкций и др. Эти территории стали местом отчуждения и стали использоваться для складирования отходов домохозяйств и садоводческих товариществ, вывоза остатков строительных конструкций и материалов. Заброшенные территории с остатками заглубленных и наземных инженерных сооружений были привлекательны для поиска и изъятия металлолома, а также для экстремального индустриального туризма. Отсутствие информации о реальной и мнимой опасности, умалчивание масштабов проблемы порождало слухи о радиационной, токсичной и эпидемиологической опасности бывших военных объектов [2,3].

С начала 2000х гг. в рамках государственного оборонного заказа практически полностью завершена ликвидация инфраструктуры боевых позиций, выполнена техническая рекультивация высвобожденных территорий [4]. С этой целью были выполнены геодезические работы для создания топографической основы в масштабах 1:1000 с высотой сечения рельефа горизонталями через 0,5 м, проведены дополнительные исследования почвенно-растительного слоя. По результатам проведенных изысканий планировалось разрабатывать и представлять на государственную экологическую экспертизу проекты рекультивации нарушенных земель.

Цель настоящей работы заключалась в эколого-гигиенической оценке текущего состояния территорий площадок с ШПУ в Пермском и Кунгурском муниципальных районах Пермского края.

Комплексное эколого-гигиеническое обследование на указанных территориях размещения выведенных из эксплуатации и ликвидированных ШПУ выполнено в рамках реализации Федеральной целевой программы «Промышленная утилизация вооружения и военной техники на 2011-2015 годы и на период до 2020 года».

Объектом эколого-гигиенической обследования являлись 11 стартовых позиций с ШПУ, выведенных из эксплуатации в период 1975-2010 гг. Все площадки компактно расположены на удалении от 20 до 120 км южнее административного центра Пермского края, географически они были объединены в восемь районов обследования. На объектах в конце 1990х гг. выполнены работы по уничтожению инфраструктуры объектов и фундаментов специальных сооружений, которые выполнялись путем демонтажа или с применением подрыва, и частично проведены работы по восстановлению нарушенных территорий. Но в процессе технической рекультивации не все подземные сооружения были ликвидированы, низкое качество засыпки пустот и котлованов в ряде случаев привело к образованию просадок грунта и к самопроизвольному вскрытию шахтных стволов.

В ходе обследования установлено, что рекультивация проведена на всех обследованных площадках ликвидированных ШПУ одиночного старта. В то же время на 50% объектов отмечены попытки несанкционированного вскрытия остатков сооружений для извлечения металлов. Две пло-

щадки вскрыты до глубины разрушенных стволов шахтных сооружений, которые открыты и заполнены водой. Территория большинства площадок захлавлена коммунальными и строительными отходами. На момент обследования стихийные свалки выявлены на 75% подконтрольных объектов. Площадка с ШПУ группового расположения после подрыва в течение более 40 лет находилась в состоянии руин, представляющих опасность для людей и животных.

Характеристика, условия и виды хозяйственного использования территории размещения выведенных из эксплуатации площадок ШПУ обобщены по данным Публичной кадастровой карты (<http://pkk5.rosreestr.ru>). Из анализа этой информации следовало, что в основном площадки ликвидированных ШПУ находятся на землях лесного фонда, и лишь небольшая их часть (один позиционный район) — на землях сельскохозяйственного назначения.

На этапе подготовки к обследованию были изучены материалы по климатическим, метеорологическим и ландшафтным условиям территории; исследованы схемы и материалы с описанием площадок аналогичных стартовых позиций; проанализированы исходные данные по эксплуатации площадки до её ликвидации; выявлены потенциально опасные объекты загрязнения на территории; разработана рабочая схема и план отбора проб; подготовлены акты отбора проб, оборудование и расходные материалы.

В соответствии с программой обследования проводился отбор и проб почвы, растительности, воды и строительных отходов [5,6]. Отбор проб объектов окружающей среды был проведен в соответствии с требованиями нормативных документов: ГОСТ 17.4.3.01-83, ГОСТ 17.4.4.02-84, СанПиН 4266-87, ПНД Ф 12.1:2:2.2:2.3.2-03, РД 52.18.718-2008, ГОСТ 31862-2012, ГОСТ Р 51593-2000, СанПиН 2.1.5.980-00.

Итого было отобрано 195 точечных проб почвы с глубины 0-25 см и сформировано 36 объединенных проб почвы, дополнительно отобраны 3 фоновые пробы. Всего на исследование передано 39 проб почвы.

На каждой площадке на расстоянии 200 м от геометрического центра бывшей ШПУ взяты образцы растительности. За пределами пробных площадок отобрали 3 фоновые пробы растительности, всего объединенные пробы на все районы, состоящие из пяти точечных проб каждая. Всего на исследование передано 12 проб растительности (пробы хвои, при наличии, или травяного покрова).

На рекультивированных территориях поверхностных непроточных водных объектов не обнаружено. Исключение составили две исследуемые площадки, где были отобраны 2 пробы воды из вскрытых и затопленных водой ШПУ.

Железобетонные плиты и крошка разрушающихся строительных конструкций были обнаружены на одной из площадок, поэтому для исследования был взят только один образец строительных отходов, составленный из пяти точечных проб.

Перечень исследуемых показателей включал показатели специфического (характерного для объекта обследования химического загрязнения): компоненты жидких ракетных топлив и продуктов их трансформации - несимметричный диметилгидразин (НДМГ), нитрозодиметиламин, диметиламин и формальдегид; металлы (свинец, ртуть, никель, кадмий, кобальт, цинк, медь, хром); 3,4 бенз(а)пирен, мышьяк и нефтепродукты. По показателям радиационного загрязнения измерялись МАЭД гамма-излучения и удельная активность техногенного радионуклида цезий-137, как индикатора вторичного техногенного загрязнения.

Исследования выполнены в лабораториях ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна» ФМБА России (г.Москва) и в Исследовательском аналитическом центре НИИ химии ФГБОУ ВПО «ННГУ им. Н.И. Лобачевского» (г. Нижний Новгород).

По результатам исследований проб почвы выявлено, что НДМГ и продукты его трансформации значительно ниже ПДК. Следовые количества НДМГ, обнаруженные в 7 пробах почвы, находятся на уровне чувствительности методики выполнения измерений. Формальдегид присутствовал в 22 пробах (56%), при этом содержание не превысило ПДК, а средние значения показателя по всем площадкам оказались на уровне фоновых.

По результатам исследования почвы на тяжелые металлы и бенз(а)пирен превышений ПДК не обнаружено. Вместе с тем на площадке с ШПУ группового расположения в пробах зафиксированы соединения меди на уровне близком к ПДК, что предположительно является следствием обжига кабельных изделий на территории площадки.

По содержанию нефтепродуктов в почве с рекультивированных территорий установлено содержание менее 1000 мг/кг (допустимый уровень загрязнения). В пробах почвы с нереккультивированной территории площадки с ШПУ группового расположения содержание нефтепродуктов превышало фоновые значения более чем в два раза и оценивается как умеренно опасное.

Во всех пробах фиксировалось повышенное содержание мышьяка по сравнению с ПДК. Более чем в 60% случаев содержание мышьяка в почве превышает установленный уровень ПДК. Обнаруженное повышенное содержание этого элемента в почвах обусловлено естественными геохимическими факторами, характерными для данного региона.

Для оценки радиационной обстановки было выполнено 60 измерений МАЭД гамма-излучения, из них 54 измерения непосредственно на площадках и 6 фоновых измерений. Диапазон измеренных значений МАЭД гамма-излучения для всех контрольных точек не превышал предельных значений природного радиационного фона (0,07 до 0,12 мкЗв/час.)

Удельная активность Cs137 всех проб почвы находится ниже или на уровне фоновых значений 3,1-7,0 Бк/кг. Таким образом, обследованные площадки в Пермском крае с момента их рекультивации и до настоящего времени не подверглись вторичному техногенному радиоактивному загрязнению.

Результаты исследований проб воды и растительности показали отсутствие НДМГ или продуктов его трансформации. По показателям загрязнения воды нефтепродуктами и тяжелыми металлами превышений ПДК не выявлено.

По результатам обследования площадок ШПУ в Пермском крае можно сделать следующие выводы:

1. После вывода из эксплуатации все площадки ШПУ одиночного старта были ликвидированы и на их территории проведена техническая рекультивация.

2. По результатам санитарно-химических исследований проб почвы, воды и растительности не обнаружено превышений установленных гигиенических нормативов содержания специфического загрязнения, тяжелых металлов и полиароматических углеводородов. Во всех пробах почвы, включая фоновые, обнаружено содержание мышьяка выше уровня ПДК, что обусловлено естественными геохимическими факторами. Обследованные площадки с момента их рекультивации и до настоящего времени не подверглись вторичному техногенному радиоактивному загрязнению.

3. Доступность площадок ШПУ для населения и отсутствие эффективного контроля со стороны надзорных органов создает предпосылки для осуществления несанкционированной деятельности, включая несанкционированное размещение отходов. Половина ранее рекультивированных площадок подвергались попыткам вскрытия вплоть до уровня нахождения остатков шахтных сооружений с целью извлечения лома цветных и черных металлов.

4. После вскрытия бесхозные площадки ШПУ представляют собой объекты повышенного риска, обусловленного наличием остатков инженерных сооружений, бесконтрольностью доступа к ним и возможностью захламления территории.

Литература

1. *Технические и экологические аспекты ликвидации МБР: монография; под общ. ред. М.И. Соколовского, Я.И. Вайсмана. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2009. – 636 с.*
2. *Жданов Д.Ф., Тарабара А.В., Батракова Г.М., Чистяков С.В. Об экологической обстановке в местах размещения бывших боевых стартовых позиций для межконтинентальных баллистических ракет// Науч.-техн. сб. трудов Международного военно-техн. форума «Армия-2019». – г. Балашиха: Типография ВА РВСН им. Петра Великого, 2019. С. 50-63.*
3. *Чистяков С.В., Алехнович А.В., Тарабара А.В. Эколого-гигиеническая и токсикологическая оценка окружающей среды в районе выведенных из эксплуатации бывших объектов Министерства обороны // Гигиена и санитария. 2017. Том 96, №9. С. 833-839.*
4. *Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду. Под общей ред. В.В. Адушкина, С.И. Козлова, М.В. Синельникова М.: ГЕОС, 2016. – 795 с.*
5. *Методическое пособие по обеспечению экологической безопасности территорий размещения шахтных пусковых установок после вывода их из эксплуатации и рекультивации земель. – М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, 2018. – 60 с.*
6. *Вредные химические вещества в ракетно-космической отрасли. Справочник. Под общей ред. проф. д.мн.Уйба В.В. – М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, 2011. – 408 с.*

ИЗУЧЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ГРУНТОВ КАК ВТОРИЧНОГО ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИЯХ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО

И.В. Галицкая, И.А. Костикова

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер. 13, стр.2, Москва, 101000, Россия. E-mail: galgeoenv@mail.ru

В настоящее время в России в рамках федерального проекта «Чистая страна» национального проекта «Экология» проводится масштабная рекультивация свалок и полигонов ТКО, направленная на снижение негативного воздействия объектов накопленного вреда на окружающую среду. После закрытия полигона период стабилизации тела полигона может быть значительным, а загрязненные грунты (в данном случае согласно [1] грунт – это «любая горная порода, почва, .. техногенные минеральные образования, ... изучаемые в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью») в течение длительного времени быть вторичным источником загрязнения подземных вод и оказывать негативное воздействие на здоровье населения при пылении поверхностного слоя грунта.

В настоящее время при оценке опасности воздействия грунтов используются в основном два подхода, разработанные для почв и заключающиеся в оценке превышения концентрации компонента по отношению к: 1) ПДК (ОДК), 2) к фону. Опыт экологических исследований, проводимых авторами на многочисленных объектах, позволяет сделать вывод, что использование данных подходов в каждом конкретном случае должно быть обосновано. К сожалению, их применение в большинстве случаев является достаточно формальным.

Наиболее дискуссионными являются такие аспекты как: 1) использование ПДК (ОДК) для оценки опасности грунтов с позиций воздействия на здоровье населения, 2) использование действующих критериев для оценки опасности грунтов как вторичного источника загрязнения, 3) недостаточная обоснованность корреляции категорий загрязнения почв и изменения показателей здоровья населения в очагах загрязнения, 4) использование при расчете суммарного показателя загрязнения почв (Z_c) региональных, а не базисных значений фона.

Основная задача данной статьи – оценить опасность загрязнения отложений зоны аэрации в районах размещения свалок ТКО с помощью различных методов и критически проанализировать преимущества и недостатки используемых подходов.

При решении данной задачи, кроме исследования грунтов как вторичного источника загрязнения подземных вод, также была проведена оценка опасности их воздействия на здоровье человека с использованием действующих нормативов ПДК (ОДК) и фоновое содержание.

Для исследований был выбран ряд полигонов ТКО в Московском регионе, отличающихся размером площади участка захоронения отходов: малые – до 5,0 га, средние – 5-12 га, крупные – 50-110 га. При оценке опасности загрязнения отложений на участках расположения данных полигонов были собраны и проанализированы материалы инженерно-геологических и инженерно-экологических исследований, проведенных различными организациями. В ходе изысканий в грунтах были определены содержания валовых форм химических элементов I-III классов опасности. Более широкий перечень химических элементов определялся только на крупных полигонах. Подвижные формы элементов определялись в редких случаях.

Оценка уровня химического загрязнения грунтов как индикатора неблагоприятного воздействия на здоровье населения проводилась по показателям, разработанным при сопряженных геохимических и гигиенических исследованиях: коэффициенту концентрации химического вещества (K_c) и суммарному показателю загрязненности (Z_c). K_c определяется отношением фактического содержания определяемого вещества в грунте в мг/кг почвы к фоновому. Суммарный показатель загрязнения Z_c , по величине которого определяется категория загрязнения, рассчитывался как сумма n аномальных ($K_c > 1$) коэффициентов концентраций металлов I-III классов опасности – $Z_c = \sum K_c - (n-1)$. Для выяснения влияния различных фоновых содержаний на величину Z_c и структуру геохимических ассоциаций загрязняющих элементов проведен сравнительный анализ различных подходов к выбору фоновых концентраций веществ. В качестве фоновых значений были использованы: 1) нормативные

значения для средней полосы России для дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв по СП 11-102-97 (региональный фон), 2) базисные фоновые значения районов конкретных полигонов (локальный фон), 3) кларки почв [2].

Кроме того, при оценке опасности загрязнения почв использовался подход, заключающийся в оценке превышения концентрации компонента по отношению к ПДК (ОДК). Отметим, что использование ПДК (ОДК) для оценки опасности почв с позиций воздействия на здоровье населения остается дискуссионным, несмотря на широкое применение.

При количественной оценке грунтов как вторичного источника загрязнения подземных вод использовались два подхода. При первом подходе концентрации химических элементов в отложениях сравнивались с миграционным водным показателем вредности. При определении степени опасности грунтов как вторичного источника загрязнения были использованы следующие градации отношений содержания элемента к миграционному водному показателю (К): $1 < K < 3$ – низкая степень опасности; $3 < K < 10$ – средняя степень опасности; $10 < K < 30$ – высокая степень опасности; $K > 30$ – очень высокая степень опасности. При втором подходе проводились расчеты влаго- и массопереноса с использованием программного комплекса WHI Un Sat Suite Plus 2.2.0.2 [5].

Результаты оценки загрязнения грунтов по отношению к различным значениям представлены в виде геохимической ассоциации химических элементов, где индекс справа от символа химического элемента – величина коэффициента концентрации K_c .

Полигоны ТКО, занимающие площадь до 3 га

Полигон ТКО «Ядрово»

По отношению к *региональному фону* ассоциация загрязняющих элементов в поверхностном суглинистом слое 0-0,2 м имела следующий вид – Cd(2,2) As(1,5). Ниже по разрезу структура ассоциаций не изменялась, коэффициенты концентрации варьировали в незначительных пределах. Величина Z_c в верхнем слое составляла 2,6, в целом по разрезу – 1,9-2,9. Таким образом, категорию загрязнения отложений можно оценить, как допустимую. По отношению к *кларку почв* вид ассоциации существенно изменился, ассоциация представлена только ртутью – Hg (6,5-7,0). Величина Z_c в слое 0-0,2 м – 6,5-7,0, ниже по разрезу изменяется очень незначительно в пределах 4,2-7,1. В целом, несмотря на более высокие значения суммарного показателя загрязнения категория загрязнения почв – допустимая. По отношению к *ПДК(ОДК) и миграционному водному показателю* превышений не зафиксировано.

Полигон ТКО «Дубна»

По отношению к *региональному фону* уровень загрязнения отложений и ассоциации загрязняющих веществ на разных участках значительно изменялись. В поверхностном слое почв на участках максимального загрязнения ассоциации имели следующий вид: Cu(41,3) Zn(10,5) Cd(10,3) Hg(4,7) Ni(1,7) Pb(1,4), Hg(69,2) Cu(2,6) Cd(1,7) Zn(1,1) и Hg(25,7) Cd(2,6) Cu(1,3) (величина Z_c – 27,7-71,6). На остальных участках ассоциация чаще всего была представлена одним элементом – кадмием, медью или цинком, или сочетанием данных элементов, величина Z_c не превышала 5,5.

По отношению к *кларку почв* в ассоциации на первое место вышла ртуть Hg(47) Cu(31) Zn(9,5) Cd(2,5) Pb(2,2) Ni(1,3), на участках максимального загрязнения величина Z_c достигала 693 (чрезвычайно опасная категория загрязнения). Однако нельзя исключить, что такие высокие содержания ртути связаны с ошибками анализа или обработки данных. По отношению к *ПДК/ОДК* отмечено превышение по ртути (до 3,3 ПДК), меди (до 4,7 ПДК) и цинку (до 2,1 ПДК). По отношению к *миграционному водному показателю* превышения отмечены только на участке максимального загрязнения: здесь зафиксирован низкий уровень загрязнения по меди и средний – по цинку.

Полигоны ТКО, занимающие площадь 6-12 га

Полигон ТКО «Каурцево»

По отношению к *региональному фону* ассоциация загрязняющих элементов в слое 0-0,2 м имела следующий вид – Cd (6,6) Pb(4,3-4,5) Zn(2,7-2,8) Cu(2,3-2,5). Ниже, в слое 0,2-1,0 м структура ассоциаций изменилась, второе место в ассоциации заняла медь. Суммарный показатель загрязнения в целом варьировал в пределах 12,8-16,1 (допустимая категория загрязнения), повышенные значения отмечены в слое 0,2-1,0 м. По отношению к *местному фону* ассоциация в поверхностном слое при-

обрела более сложный вид Zn(11,3-11,5) Cu(7,2-7,8) Hg(5,8) Pb(4,1-4,3) Ni(3,6-3,9) As(1,9-3,9) Cd(2,5-2,6). Величина Z_c составляла 30,7-33,3 (умеренно опасная и опасная категории загрязнения). Таким образом, категория загрязнения отложений стала более опасной. В слое 0,2-1,0 м величина Z_c увеличилась, достигая 42 в основном за счет увеличения содержания меди. По отношению к *кларку почв* в ассоциации на первое место выходит ртуть. В слое 0,0-0,2 м – Hg(6,9) Pb(6,4-6,7) Zn(2,4-2,6) Cu(1,7-1,8) Cd(1,6), величина Z_c – 15,1-15,6 (допустимая категория). Ниже по разрезу существенных изменений в структуре ассоциации не прослеживается, но в отдельных слоях цинк и медь меняются местами. По отношению к *ПДК(ОДК)* превышений не выявлено. По отношению к *миграционному водному показателю* отмечен низкий уровень загрязнения по никелю, меди и цинку.

Полигон ТКО «Часцы»

По отношению к *региональному фону* также, как и на предыдущих участках в ассоциацию загрязняющих веществ входили кадмий, свинец, мель, цинк – Cd(4,8-6,5) Pb(2,4-4,5) Cu(2,4-4,2) Zn(1,9-2,9), но на разных участках соотношение свинца, меди и цинка изменялось. Величина Z_c варьировала по разрезу незначительно и не превышала 15,8 (допустимая категория загрязнения).

По отношению к *местному фону* ассоциация в поверхностном слое приобрела более сложный вид – Zn(8,7-16,5) Cu(7,5-13,2) Ni(1,9-6,4) Pb(3,1-5,8) As(1,4-5,5) Cd(2,1-2,8) Mn(2,1-2,7) Hg(1,8-2,5). Величина Z_c увеличилась, составляя 26,1-39,5 (умеренно опасная и опасная категории загрязнения). Таким образом, категория загрязнения отложений стала более опасной. В слое 0,2-1,0 м уровень загрязнения по Z_c достиг 47,6 в основном за счет увеличения содержания цинка и меди.

По отношению к *кларку почв* ассоциация имела вид – Hg(4,8-9,5) Pb(3,6-6,7) Zn(1,4-2,6) Cu(1,8-3,2) Cd(1,2-1,6), ниже по разрезу существенных изменений в структуре ассоциации не прослеживается, но в отдельных слоях свинец, цинк и медь меняются местами. Величина Z_c составляла от 9,7 до 17,4 (категории загрязнения от допустимой до умеренной опасной).

По отношению к *ПДК(ОДК)* превышений не зафиксировано. По отношению к *миграционному водному показателю* отмечен низкий уровень загрязнения по никелю и меди.

Полигон ТКО «Непейно»

На большинстве обследованных участков ассоциация загрязняющих веществ по отношению к *региональному фону* представлена только кадмием – Cd(1,4-14,2) и только на одном участке зафиксирована более полная ассоциация – Cd(5,5) Pb(2,9) Hg(1,9) Cu(1,6) As, Ni(1,1). Величина Z_c не превышала 14,2 (допустимая категория загрязнения).

По отношению к *кларку почв* ассоциация загрязняющих веществ в основном представлена ртутью, свинцом, кадмием, на участке максимального загрязнения – Hg(19) Pb(4,3) Cd(1,3) Cu(1,2). Величина Z_c не превышала 14,2 (допустимая категория загрязнения), за исключением одного участка, где отмечена умеренно опасная категория загрязнения ($Z_c=22,8$).

По отношению к *ПДК(ОДК)* превышений не отмечено. По отношению к *миграционному водному показателю* на ряде участков отмечен низкий уровень загрязнения по никелю.

Полигон ТКО «Вальцево»

По отношению к *региональному фону* ассоциация загрязняющих веществ в основном представлена серебром или кадмием – As(1,1-2,1) или Cd(1,3-2,1). Только на двух наиболее загрязненных участках вид ассоциации усложняется – Pb(4,6) Cu(3,8) Cd(1,8) и Cd(45,5) As(1,5) Cu(1,1). Ниже по разрезу в слое 1,0-2,0 м незначительные превышения фона отмечены для никеля. Значения Z_c в основном не превышали 8,2 (допустимая категория загрязнения), за исключением одного участка, где величина Z_c достигала 46,1 (опасная категория загрязнения), а ассоциация имела вид – Cd(45,5) As(1,5) Cu(1,1).

По отношению к *кларку почв* вид ассоциации изменился, на большинстве участков в ассоциации присутствовала только ртуть – Hg(1,1-6,8). На наиболее загрязненных участках ассоциации имели вид – Pb(6,9) Hg(6,8) Cu(2,9) и Cd(10,9) Hg(3,6) и значения Z_c не превышали 14,6 (допустимая категория загрязнения).

По отношению к *ПДК(ОДК)* превышения отмечены только на двух участках – Pb(1,06) и As(1,6). По отношению к *миграционному водному показателю* отмечен низкий уровень загрязнения по никелю.

Полигоны ТКО, занимающие площадь более 60 гектаров

Полигон ТКО «Кучино»

В почвах этого полигона определялся наиболее полный перечень элементов I-III классов опасности – V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Sb, Ba, W, Hg, Pb, Bi. Все эти элементы в разной последовательности представлены в ассоциациях на участках опробования.

По отношению к *региональному фону* величина Z_c изменялась от 1,1 до 100,2 (от допустимой до чрезвычайно опасной категории загрязнения). На участке максимального загрязнения ассоциация имела следующий вид: Cd(76,7) Cu(12,1) Zn(5,6) Hg(4,9) As(3,1) Pb(2,8).

По отношению к *кларку почв* вид ассоциации изменился и на большинстве участков на первое место вышла ртуть, на участке максимального загрязнения – Hg(160) Pb(12,4) Cu(4,4) Zn(1,8) As(1,3). Величина Z_c составляла от 1,2 до 175,9 (от допустимой до чрезвычайно опасной категории загрязнения).

По отношению к *местному фону* величина Z_c изменялась от 1,8 до 153,9 (от допустимой до чрезвычайно опасной категории загрязнения). На участке максимального загрязнения ассоциация загрязняющих веществ имела вид: Cd(92) Cu(16,7) Bi(12,3) Hg(10,7) Cr(9,8) Zn(8,6) W(4,4) Mo(2,5) Ni(2,4) As(2,1) Pb(1,9) Sb (1,3) Ba(1,3).

По отношению к *миграционному водному показателю* в 34% проб ассоциация представлена только хромом, в 46% – хромом и никелем. Величина Z_c изменялась от 2,3 до 39,1. На наиболее загрязненных участках обобщенная ассоциация имела следующий вид: Cr(17,3-38,2) Zn(1,3-10,9) Cu(1,3-2,9) Ni(1,7-1,9) Pb(1,4). Таким образом, отмечена очень высокая степень опасности для хрома, высокая – для цинка, средняя – для мышьяка, низкая – для меди, никеля, свинца.

Полигон ТКО «Тимохово»

По отношению к *региональному фону* только на трех из 28 участков выявлены ассоциации загрязняющих веществ As(2,6), Pb(13,6) Cu(2,5) и Zn(1,5). Величина Z_c не превышала 15,1 (допустимая категория загрязнения).

По отношению к *местному фону* состав ассоциации существенно расширился, в ассоциацию вошли свинец, медь, цинк, никель, ртуть, мышьяк. Pb(35,7) Cu(10,1) Zn(2,4) Ni(1,4) Hg(1,1) Величина Z_c составляла 1,1-46,6. Уровень полиметаллического загрязнения почв оценивается для большинства опробованных образцов как допустимый, на двух участках – умеренно-опасный, на одном – опасный.

По отношению к *кларку почв* величина Z_c 1,4-22,1 (от допустимой до умеренно опасной категории). Ассоциации загрязняющих веществ на большинстве участков представлены ртутью, свинцом, медью, цинком на участках наиболее высокого загрязнения – Hg(9) Pb(3,9) Cu(3,2) Zn(2,5). Величина Z_c – 1,1-15,5. Ассоциации загрязняющих веществ в основном представлены только ртутью, на участке максимального загрязнения – Pb(20,4) Cu(1,9) Hg(1,8).

По отношению к *ПДК(ОДК)* превышения отмечены только на одном участке – Pb(1,6). По отношению к *миграционному водному показателю* превышений не отмечено.

Количественная оценка грунтов как вторичного источника загрязнения подземных вод

Как показали результаты изучения уровня загрязненности отложений на участках расположения полигонов ТКО) по отношению к *миграционному водному показателю*, наиболее опасный источник вторичного загрязнения подземных вод – полигон ТКО «Кучино», где была отмечена очень высокая степень опасности для хрома. В связи с этим в качестве объекта для применения подхода с использованием моделирования влаго- и массопереноса в зоне аэрации был выбран данный полигон, а в качестве загрязняющего вещества выбран хром.

Предполагалось, что: 1 – профиль загрязнения формируется за счёт поступления с инфильтрацией ионов хрома в период функционирования свалки (50 лет); 2 – после рекультивации полигона в дальнейшем загрязнение не поступает и начинается процесс очищения зоны аэрации. Общее время моделирования составило 100 лет.

Интенсивность инфильтрации принималась постоянной – 100 мм/год, что соответствует среднесуточному значению. Концентрация ионов хрома в инфильтрационном питании принималась постоянной и равной содержанию хрома в пробе с максимальным из зафиксированных значений – 250 мг/л.

Профиль двуслойный. В верхней части песчаные отложения мощностью 6 м с коэффициентом фильтрации 10 м/сут, в нижней части суглинки мощностью 3 м с коэффициентом фильтрации 0,0005 м/сут. Глубина до уровня грунтовых вод – 5 м.

Расчеты проводились в несколько этапов при помощи программного комплекса WHI Un Sat Suite Plus версия 2.2.0.2, разработанного в Waterloo Hydrogeologic Institute в 2002 г. [5].

Моделировалось формирование профиля загрязнения и последующее очищение зоны аэрации по модели VS2DT. Значения параметров дисперсии, молекулярной диффузии, плотности скелета сухой породы принимались для всех типов отложений по умолчанию из базы данных, включенной в Un Sat Suite Plus. Коэффициент распределения принят для верхнего слоя 2, для нижнего - 7. Результаты расчета концентрации хрома в зоне аэрации для периодов формирования загрязнения и периода очищения приведены на Рис. 1.

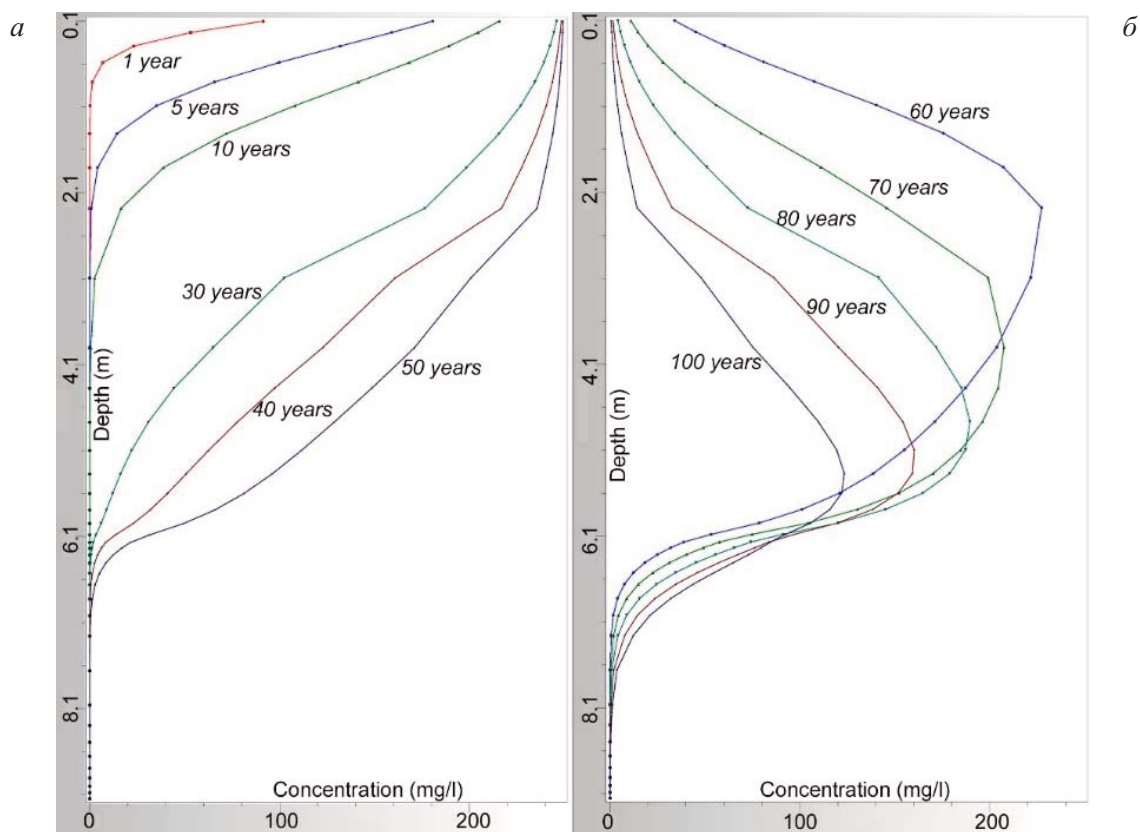


Рис. 1 Изменение содержания хрома в отложениях зоны аэрации в: а) период образования загрязнения и б) период очистки (после рекультивации полигона).

Формирование профиля загрязнения и последующая очистка ненасыщенной зоны моделировались по модели VS2DT. Значения параметров дисперсии, молекулярной диффузии и плотности скелета сухой породы взяты для всех типов отложений по умолчанию из базы данных, входящей в состав Un Sat Suite Plus. Коэффициент распределения принят для верхнего слоя 2, для нижнего слоя 7.

При моделировании массопереноса в зоне аэрации принимались относительно высокая фильтрационная проницаемость отложений (10 м/сут) и низкие значения K_d (2 мл/г). При этом результаты моделирования показывают процесс распространения загрязнения как медленный, время протекания которого измеряется десятками лет. Концентрации, близкие к концентрации на входящей границе (250 мг/л), формируются в приповерхностном слое, достигая глубины 1,5 м только через 50 лет. С такими же скоростями происходит очищение загрязненного профиля. Через 50 лет на некоторых глубинах сохраняются концентрация более половины от исходного загрязнения.

Таким образом, полученные данные позволили установить уровень полиметаллического загрязнения почв на рассматриваемых участках и определить основные геохимические ассоциации загрязняющих металлов и металлоидов, полученные с использованием различных реперных показателей. Сравнение использования различных фоновых параметров (региональных и базисных) при

оценке уровня загрязнения отложений показало, что величина Z_c и, соответственно, категория загрязнения существенно зависят от выбора фоновых концентраций. Кроме того, происходит изменение структуры геохимической ассоциации, отражающей уровень аномальности химических элементов. Отмечается существенная разница в уровне загрязнения почв при использовании кларков элементов в почвах, региональных и локальных фоновых содержаний.

При оценке опасного состояния почв и пород относительно ПДК необходимо учитывать, что об опасности непосредственного воздействия на человека можно судить в основном по сравнению концентрации загрязняющего вещества с миграционным воздушным показателем, а величина данного показателя нормируется в основном для ртути и ряда органических соединений (бензол, толуол, стирол и др.). По сравнению с ПДК (ОДК) более обоснованным при оценке опасности почв и пород зоны аэрации с позиций воздействия на здоровье человека является использование величины суммарного показателя загрязнения Z_c , являющегося индикатором неблагоприятного воздействия на здоровье населения.

Рассматривая вопрос о корреляции категорий загрязнения почв (выделенных по величине Z_c) и изменения показателей здоровья населения, важно отметить, что категории загрязнения были установлены на основании обобщения результатов исследований состояния здоровья населения на территориях, характеризующихся различным уровнем загрязнения. По данным [4] наблюдается явно выраженная корреляция заболеваемости населения, особенно детского, с аномалиями химических элементов техногенной природы в почвах. Очевидна сложность исследования корреляции между уровнем загрязнения почв и здоровьем населения в связи с действием других факторов, среди которых один из основных – загрязнение атмосферного воздуха. В настоящее время Z_c широко используется при проведении эколого-геохимических исследований, однако, его корреляция с заболеваемостью населения требует дальнейших исследований.

При рассмотрении целесообразности применения базисных концентраций элементов в качестве фона следует отметить следующее. В нормативных документах фон определяется как содержание вещества на территориях вне сферы локального антропогенного воздействия территорий, не подвергающихся техногенному воздействию или испытывающих его в минимальной степени. В то же время ряд исследователей считает (например, [3]), что на урбанизированных территориях в качестве точки отсчета, относительно которой следует производить оценку состояния компонентов экосистемы, следует применять базисные концентрации элементов, т.е. концентрации, характерные для данной экосистемы до начала планируемой хозяйственной деятельности в ее пределах. Результаты, полученные при использовании предлагаемого «базисного» подхода для оценки опасности загрязнения отложений на участках расположения полигонов ТКО, подтвердили целесообразность его применения на урбанизированных территориях.

В современной практике оценка отложений грунтов зоны аэрации как источника вторичного загрязнения подземных вод обычно проводится по степени их загрязнения по отношению к ПДК подвижных форм или (что более обосновано) к миграционному водному показателю вредности. К основным недостаткам данного метода относятся следующие: 1) данный показатель разработан для ограниченного количества химических элементов, 2) использование метода не позволяет количественно оценить влияние вторичного источника загрязнения на подземные воды и время достижения загрязняющими компонентами уровня грунтовых вод.

На основании сравнения различных подходов к оценке опасности отложений зоны аэрации как вторичного источника загрязнения подземных вод выяснено следующее. Использование первого подхода не позволяет определить реальную опасность загрязненных пород, оценить время достижения загрязняющих компонентов уровня грунтовых вод, концентрацию загрязнения, поступающего в подземные воды. Градации оценки почв как вторичного источника загрязнения по отношению к индексу миграции воды могут быть использованы только для ориентировочных сравнительных характеристик.

Для оценки опасности зоны аэрации как вторичного источника загрязнения подземных вод наиболее перспективным является подход, заключающийся в моделировании влаго- и массопереноса (прогноз концентраций, поступающих на уровень грунтовых вод в заданные периоды времени, и в разрезе зоны аэрации). Сложность в применении данного метода заключается в основном в параметрическом обеспечении, а именно, в определении параметров сорбции. При применении лабораторных методов величины параметров сорбции, как правило, очень завышены. Кроме того, на

участках расположения полигонов ТКО значительную роль играет органическое вещество, в связи с чем необходимо знать параметры сорбции комплексных соединений металлов с органическим веществом.

Литература

1. *ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация» утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 июля 2020 г. № 384-ст.*
2. *Лукашев В.К., Лукашев К.И. Геохимия ландшафтов. Минск: Вышэйша школа, 1972.–358 с.*
3. *Москаленко Н.Н., Гинзбург Л.Н. Городские агломерации: проблема геохимического фона // В сб. «Проблемы управления качеством городской среды». М.: «Прима-Пресс». 2001. –С. 82-86.*
4. *Сает Ю.Е., Ревич Б.А. Геохимические аспекты экологии человека в городе // Проблемы экологии человека. М.. Наука. – 1986. – С. 33-42.*
5. *Gogolev, M.I. et al. 1-D Unsaturated zone groundwater flow and contaminant transport modeling using VLEACH, PESTAN, VS2DT and HELP). WHI Un Sat Suite user's manual. WHI publication, 2002.*

БИОДИАГНОСТИКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ

И.Ю. Григорьева, А.В. Морозов, С.С. Садов

МГУ им. М.В.Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии,
ул. Ленинские горы д.1, Москва, 119991, Россия. E-mail: ikagrig@inbox.ru

В последнее десятилетие контроль качества окружающей среды с использованием различных биологических объектов (биодиагностика) оформился как актуальное научно-прикладное направление [2]. Однако в практике геоэкологических исследований оценка состояния различных систем и объектов осуществляется преимущественно путем определения аналитическими методами наличия в окружающей среде отдельных потенциально вредных веществ или воздействий. В дальнейшем проводится сравнение полученных результатов с законодательно установленными для этих веществ и воздействий допустимыми величинами (ПДК, ПДВ, ПДС и т.д.). До сих пор совершенно игнорируется тот факт, что аналитические способы контроля имеют ряд существенных недостатков [4]. Достаточно принять во внимание только тот факт, что в настоящее время нормированы лишь 0,01% из миллионов потенциально токсичных веществ. Кроме того, вполне очевидно, что для условий нашей страны гармонизировать аналитические нормативы попросту нельзя, поскольку невозможно учесть влияние всех геохимических провинций, климатических факторов и т.д. К этому следует добавить, что контроль и разработка нормативов для всех возможных экотоксикантов практически неосуществим. Невозможно учесть в практической деятельности синергетический и антагонистический эффект различных веществ. Равно как и невозможно получить информацию о вторичных эффектах воздействия веществ, вызванных их накоплением и трансформацией в различных звеньях экосистем. Ни один из химико-аналитических методов не позволяет в полной мере гарантировать достоверность оценки экологической опасности и реальных рисков для здоровья населения.

Всё это явилось причиной того, что на сегодняшний день работы в области биологического контроля (после спада в конце 70-х годов XX века) вновь переживают период активного развития [8, 14-18]. Основным преимуществом методов биодиагностики является то, что при проведении экологически ориентированных исследований важны не столько сами уровни воздействий, сколько те биологические эффекты, которые они могут вызывать, и о которых не может дать информацию даже самый точный химический или физический анализ [11]. Эти методы в ряде ситуаций, позволяют быстро оценивать качество окружающей среды и наличие загрязнений, не обнаруживаемых химическими методами. Химические анализы, как известно [2, 9], показывают лишь наличие или отсутствие неких «маркеров» – определенных концентраций загрязняющих веществ (поллютантов). Во-первых, это имеет крайне ограниченное значение для прогноза и оценки состояния живых организмов, сообществ и анализируемой экосистемы в целом. И, во-вторых, не всегда удаётся выявить с достаточно степенью уверенности потенциально опасные загрязняющие вещества.

В общем случае биодиагностика – выявление причин или факторов изменения состояния среды на основе видов-биоиндикаторов с узко специфичными реакциями и отношениями. Биодиагностика традиционно подразделяется на биоиндикацию и биотестирование [9]. Биоиндикация (англ. *bio-indication*) заключается в обнаружении и определении экологически значимых природных и антропогенных нагрузок на основе реакций на них живых организмов непосредственно в среде их обитания, т.е. в полевых условиях. Биотестирование (англ. *bioassay*) же представляет собой процедуру установления токсичности среды с помощью тест-объектов (живых организмов), сигнализирующих об опасности независимо от того, какие вещества и в каком сочетании вызывают изменения жизненно важных функций у тест-объектов [2]. Биотестирование осуществляется экспериментально с использованием, как правило, стандартизованных лабораторных тест-систем, путем регистрации изменений биологически важных показателей (тест-реакций) под воздействием исследуемых проб с последующей оценкой их состояния в соответствии с выбранными критериями токсичности. Известно много биотестов с использованием различных тест-объектов, начиная от одноклеточных водорослей, бактерий и простейших и заканчивая высокоорганизованными живот-

ными [13]. Биотестирование считается эффективным методом оценки потенциальной опасности химического, физического или биологического воздействий на различные компоненты природной среды. Цели биотестирования различны в разных сферах приложения [15, 18-20]. Биотесты проводятся для определения общей токсичности, мутагенности и канцерогенности. Воздействие в тест-системе измеряется посредством имитации возможных путей поступления вредного вещества в организм. И в таком случае биотестирование подразумевает исключительно лабораторный эксперимент. И именно этот метод биодиагностики может быть в полной мере реализован для оценки экологического состояния дисперсных грунтов.

Дисперсные грунты, обладая неоднородностью состава, динамичностью изменения свойств представляются достаточно сложным объектом для разработки систем экологической оценки вообще и биотестирования в частности. К сожалению, теоретическое обоснование подходов к биотестированию грунтов на сегодняшний день практически не разработано. В тоже время достаточно активно разрабатываются модели и подходы к биодиагностике в почвенно-экологических исследованиях [13, 15-17, 19]. Однако, вполне очевидно, что почвенные горизонты в отличие от иных типов дисперсных грунтов, как объекты исследования имеют ряд характерных особенностей, которые будут определять и различие в подходах к биодиагностике этих сред.

В настоящее время биотесты в отношении грунтовых систем чрезвычайно востребованы [4]. Подобное утверждение основано на том, что утвержденными «Критериями отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду» [10] устанавливается обязательное подтверждение V класса опасности отходов на основе биотестирования. Количество отходов V класса опасности в стране достигает 80-90 % от общего объема, причём практически нацело, согласно оценкам [1, 3-4], это отходы горнодобывающей промышленности и грунты, образующиеся в результате строительной деятельности (Рис. 1).

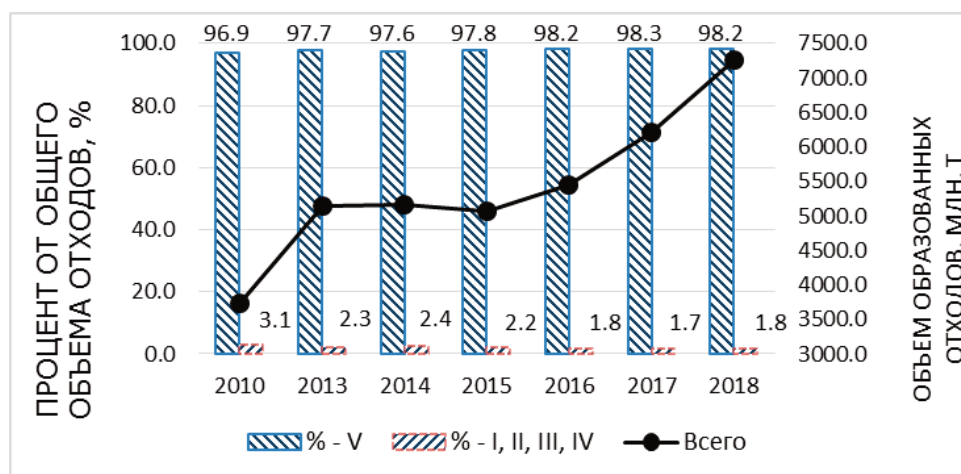


Рис. 1. Образование отходов производства и потребления по классам опасности в России, млн. т [1, 3].

Процедура установления класса опасности отходов предусматривает первоначальный расчет по данным химико-аналитических исследований, в последующем на основе проведенных расчётов для подтверждения V класса обязательным является экспериментальное исследование, представляющее собой биотестирование. И согласно действующим нормативам оценка класса опасности проводится на основе водной вытяжки из отходов, поскольку подавляющее большинство легитимных на сегодняшний день методов разработаны и применяется в отношении водной среды [2, 11, 13]. Однако, в отличие от зарубежной практики, где используется до 10 и более организмов, нормативами в нашей стране предусмотрен анализ с применением двух тест-объектов [12].

В связи со всем вышеизложенным становится очевидным актуальность разработки подходов к биотестированию дисперсных грунтов, являющемуся основой для экспериментальной оценки класса их опасности как отходов. При этом встаёт задача поиска методических подходов к биотестированию, исходя из конкретных целей дальнейшего использования этих грунтов. Как правило, согласно существующим нормативам [10], биотестирование грунтов-отходов проводится на основе

их водной вытяжки. Тогда как с позиций грунтоведения, очевидно, что для адекватной оценки подобных образцов необходимо оценивать в биотест-системе и твердый компонент грунтов.

В целом, проведенные нами многочисленные экспериментальные исследования и полевые наблюдения на различных по составу дисперсных грунтах, загрязнённых нефтью и нефтепродуктами, тяжелыми металлами, солями и т.д. позволяют сделать ряд выводов и дать рекомендации, определяющие роль биотестирования грунтов при проведении геоэкологических исследований.

Подходы к оценке экологического состояния грунтов, на наш взгляд, должны базироваться на обязательной интеграции данных как химико-аналитических, так и экотоксикологических исследований. Причём, экотоксикологические исследования (биотестирование) должны быть опережающими и определяющими необходимость проведения химико-аналитических, а не наоборот, как это в настоящее время предусмотрено действующими нормативами [10]. Так, например, по данным химико-аналитических исследований (табл. 1) в исследованных грунтах не удалось выявить инструментально-определяемых концентраций Cd и Ni. В то время как по содержанию Pb, Zn и Cu исследуемые дисперсные грунты с территории строительных объектов города Москвы имеют значимые различия.

Таблица 1.

Содержание ряда тяжелых металлов по данным энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа в изучаемых образцах дисперсных грунтов-отходов строительства для восточной части территории Москвы

Образец грунта	№ навески	As	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni
		мг/кг					
Песок	1	< 5	< 5	7	43	10	< 10
	2	< 5	< 5	9	42	17	< 10
Супесь	1	6	< 5	45	208	71	< 10
	2	7	< 5	44	211	67	< 10
Суглинок	1	8	< 5	< 5	41	31	< 10
	2	10	< 5	< 5	36	25	< 10
Контроль	C_измер	< 5	< 5	15	42	19	25
	C_атт	-	-	14	45	17	25
	±Δ	-	-	1	6	1	2

Результаты же фитотестирования этих образцов (Рис. 2) указывают на явное отсутствие сколько-либо биологически значимых концентраций потенциально токсичных веществ и соединений. В таких случаях, на наш взгляд, необходимость оценки химико-аналитическими методами количественного содержания элементов является нецелесообразной. Тем более что не всегда удастся точно определить оцениваемый спектр химических элементов.



Рис. 2. Общий вид фитотестирования на песке (а), супеси (б) и суглинке (в) в чашках Петри с использованием культуры кресс-салата (*Lepidium sativum*).

Несомненной является необходимость расширения спектра применяемых тест-организмов. Так, применение даже в отношении водных вытяжек двух представителей гидробионтов – ветвистоусых рачков *Daphnia magna* (большая дафния) и пресноводных зелёных водорослей из класса протококковых *Scenedesmus quadricauda* (сценедесмус) – продемонстрировало получение двух принципиально разных результатов оценки токсичности заданных концентраций загрязняющих веществ (табл. 2 и 3).

Таблица 2.

Биотестирования водных вытяжек из загрязнённых песков с применением ветвистоусых рачков *Daphnia magna*

Состав пробы	Процент погибших рачков				Среднее квадр. отклонение
	Повторности			Индекс токсичности, среднее	
	1	2	3		
Контроль	14	0	14	9	8,25
Дистиллят 150 мл	86	86	100	90	8,25
Гумат (0,25 г/кг)	43	14	29	29	14,29
NaCl (5г/кг)	57	71	86	71	14,29
NaCl (5г/кг) + дизельное топливо (30 г/кг)	29	14	29	24	8,25
NaCl (5г/кг)+дизельное топливо (50 г/кг)	43	57	29	43	14,29
NaCl (5г/кг) + дизельное топливо (50 г/кг) + гумат (0,25 г/кг)	57	43	57	52	8,25

В идеале с биологической точки зрения исследования должны проводиться на организмах из всех основных трофических уровней: продуцентах, консументах и редуцентах, о чём неоднократно отмечалось в работах В.А.Тереховой [13] и ряда других исследователей.

Таблица 3.

Биотестирования водных вытяжек из загрязнённых песков с применением зелёных водорослей *Scenedesmus quadricauda*

Состав пробы	Интенсивность флуоресценции хлорофилла, условн. единицы			Среднее квадр. отклонение	Отклонение от контроля
	Повторности				
	1	2	3		
Контроль	0,0376	0,0319	0,0327	0,0031	–
Дистиллят 150 мл	0,0143	0,0219	0,0175	0,0038	-47,46
Гумат (0,25 г/кг)	0,0184	0,0189	0,0224	0,0022	-41,59
NaCl (5г/кг)	0,0451	0,0501	0,0606	0,0079	52,45
NaCl (5г/кг) + дизельное топливо (30 г/кг)	0,0456	0,0516	0,0511	0,0033	45,11
NaCl (5г/кг) + дизельное топливо (50 г/кг)	0,0527	0,0595	0,0562	0,0034	64,77
NaCl (5г/кг) + дизельное топливо (50 г/кг) + гумат (0,25 г/кг)	0,0551	0,058	0,0538	0,0022	63,31

Открытым остается вопрос выбора тест-организмов. Если в отношении почвенных горизонтов оправданным является использование высших растений, почвенной мезофауны, то в отношении дисперсных грунтов применение подобных объектов видится не всегда логичным. Однако результаты многочисленных экспериментов позволяют утверждать, что наиболее приемлемы в лабораторной практике грунтоведения методы биотестирования, предполагающие использование в каче-

стве тест-организмов высшие растения. Как было показано в работе [8], информативность высших растений при решении задач биотестирования связана со следующими свойствами: а) эукариотическое состояние – структурное и морфологическое сходство X-хромосомы с хромосомами млекопитающих, включая человека; б) у растений и млекопитающих отмечается сходная чувствительность к мутагенам; в) короткий жизненный цикл; г) относительная дешевизна, особенно по сравнению с тестами на других объектах; д) возможность проводить исследования *in situ*.

Кроме того в пользу применения в качестве тест-организма высших растений может говорить и хрестоматийный пример болезни итай-итай [21]. Как известно, в случае массового хронического отравления жителей префектуры Тояма кадмием, поступающим в р. Дзиндзу из шахт рудника Камикока, первой отреагировала на токсическое воздействие повышенных концентраций этого металла именно агрокультура риса.

Одна из задач по фитотестированию в 2017 г. включена в учебное пособие по лабораторным работам [7]. Подобный вид биотестирования (фитотестирование) не предполагает сложных процедур поддержания тест-культуры, например, в случае использования организмов гидробионтов (дафний, одноклеточных водорослей) или клеток млекопитающих; является достаточно простым, легко воспроизводимым методом, не требующим дорогостоящего оборудования. И эта задача стала традиционной и выполняется магистратами кафедры инженерной и экологической геологии в рамках курса «Биодиагностика в экологической геологии».

Биотестирование должно быть обязательным, поскольку позволяет диагностировать биологически значимые содержания загрязняющих веществ и выявлять наличие токсического эффекта различных их комбинаций и пороговых значений. Это было показано на основе модельных экспериментов по оценке влияния загрязнения различного состава на реакцию используемых тест-организмов (в первую очередь, высших растений). На Рис. 3 в качестве примера приведен результат оценки биологической значимости углеводородного загрязнения песчаного грунта (моделирующего характерный состав нефтешлама).

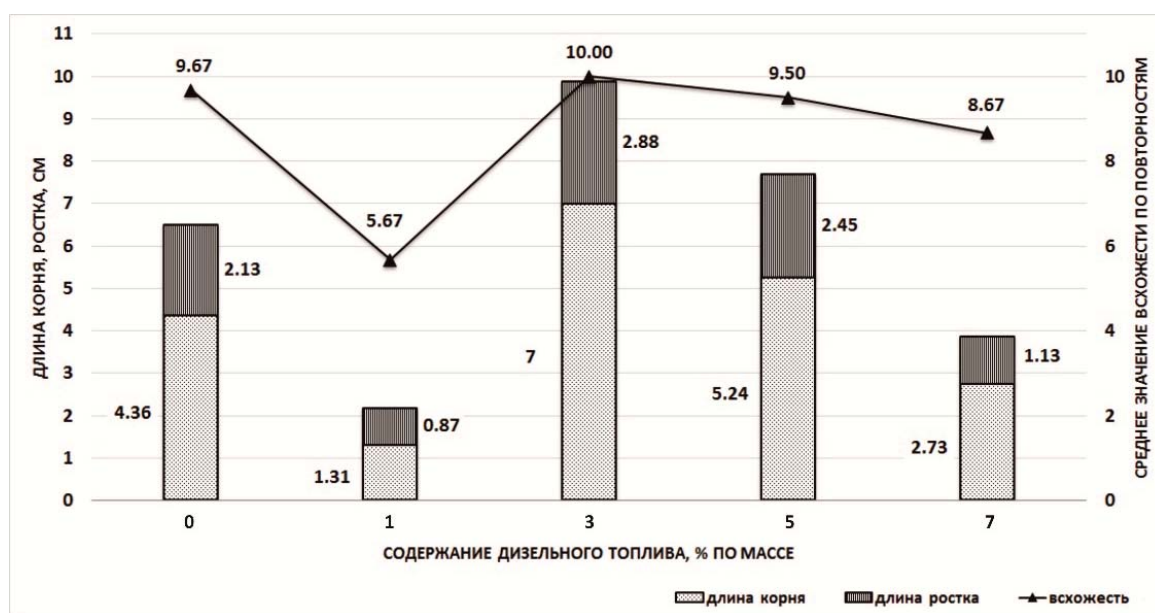


Рис. 3. Результаты оценки анализируемых тест-параметров при проведении фитотестирования с применением культуры горчицы белой (*Sinapis alba*) на мелком кварцевом песке при внесении в качестве загрязнителя дизельного топлива (ДТ).

Как видно из Рис. 3 низкие концентрации дизельного топлива (1% по массе или 10 г/кг) существенно сказываются на росте и развитии культуры горчицы белой. В дальнейшем же, по сравнению с контролем (чистым песком), наблюдается эффект стимулирования роста и развития выбранной тест-культуры (при 3 и 5%). С увеличением концентрации загрязнителя до 7% происходит закономерное снижение всех анализируемых тест-параметров: всхожести, длины корня и длины ростка. Аналогичные зависимости были получены нами при биотестировании грунтов с территории Ярегского нефтетитанового месторождения, где по данным химико-аналитических исследований ни в одной из проб не было установлено превышение ПДК анализируемых веществ, в то время как ре-

зультаты биотестирования позволили выявить токсичность донных отложений прудка-отстойника с низкими концентрациями нефтепродуктов [5]. Примечательно, что схожие результаты были получены и по другим тест-культурам высших растений.

Биотестирование необходимо проводить с учетом условий миграции возможных поллютантов как на водных вытяжках, так и непосредственно на самих грунтах, используя грунтовые пасты в качестве тестируемого субстрата. Поскольку, как показано на Рис. 4, результаты оценки могут весьма существенно различаться. Биотестирование грунтов должно обязательно включать методы, предполагающие непосредственный контакт тест-организмов с грунтом.

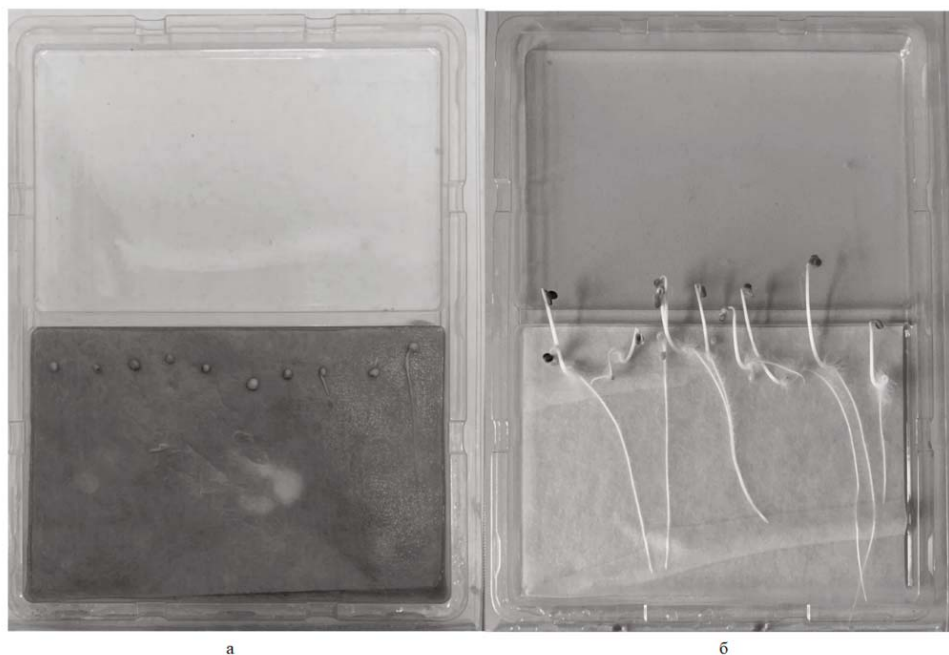


Рис. 4. Варианты фитотестирования планшетным методом с использованием культуры *Sinapis alba*: а) аппликатный (с использованием загрязнённого грунта); б) элюатный (на основе водной вытяжки). Уровень углеводородного загрязнения в обоих вариантах эксперимента одинаков.

Полученные результаты с применением аппликатного (предполагающего помещение семян выбранной тест-культуры на анализируемый грунт) и элюатного (предполагающего помещение семян высшего растения на фильтровальную бумагу, смоченную водной вытяжкой из анализируемого грунта) вариантов тестирования ярко продемонстрировали существенные различия проводимых оценок, когда при выбранных заведомо токсичных концентрациях загрязнителя по элюатному варианту эксперимента не удалось обнаружить наличия токсического эффекта на двудольную культуру – *Sinapis alba* (горчицу белую).

Проведенные экспериментальные исследования позволили уточнить ряд методических положений общих нормативных документов и рекомендовать усовершенствованные методики для широкого применения в лабораторной практике грунтоведения. Наиболее приемлемым на сегодняшний день видится использование варианта биотестирования с применением высших растений (фитотестирования).

В силу того, что объемы грунтов, требующих оценки их класса опасности как отходов неуклонно растут [6], то необходимо объединение усилий специалистов в области грунтоведения для дальнейшей теоретической разработки чётких, надежных и легко реализуемых методов биодиагностики их экологического состояния.

Литература

1. Анализ выполнения задач государственной политики в области экологического развития и соответствующих Поручений Президента Российской Федерации. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), Национальное информационное агентство «Природные ресурсы» (НИА-Природа), 2016. – 54 с.

2. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование/ О.П. Мелехова, Е.И. Сарапульцева, Т.И. Евсеева и др. — М.: Издательский центр Академия, 2010. — 288 с.
3. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2019. —844 с.
4. Григорьева И.Ю. Задачи геоэкологии и грунтоведения при экспериментальной оценке класса опасности грунтов как отходов// Сергеевские чтения: Вып. 20: Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22 марта 2018 г.). М. — РУДН Москва, 2018. — С. 106-112.
5. Григорьева И.Ю., Сарженко М.Н. О биотестировании загрязнённых грунтов при инженерно-экологических изысканиях // Геоинфо. Электронный журнал. — 2018. — № 12 сентября.
6. Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2016 году»/ Под ред. А.О.Кульбачевского. — М.: ДПиООС; НИиПИ ИГСП, 2017. 363 с.
7. Лабораторные работы по грунтоведению: Учебное пособие / Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королева. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: «КДУ», «Университетская книга», 2017. — 656 с.
8. Лисовицкая О.В., Терехова В.А. Фитотестирование основные подходы, проблемы лабораторного метода и современные решения. Москва: Изд. МГУ: «Доклады по экологическому почвоведению». 2010. — том. 13. №1. — С. 1-18.
9. Ляшенко О. А. Биоиндикация и биотестирование в охране окружающей среды: учебное пособие/ О. А. Ляшенко. — СПб: СПб ГТУРП, 2012. — 67 с.
10. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 04.12.2014 № 536 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду» (Зарегистрирован 29.12.2015 № 40330). URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View /0001201512310003> (дата обращения 20.11.2021)
11. Смуров А.В. Основы экологической диагностики. М.: Изд-во «Ойкос», 2003. — 188 с.
12. СП 2.1.7.1386–03. Определение класса опасности токсичных отходов производства и потребления. URL: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/39/39761/ (дата обращения: 20.11.2017).
13. Терехова В.А. Биотестирование почв: подходы и проблемы// Почвоведение, 2011. № 2. — С. 190-198.
14. Alwan S.W. Bioassay of crude oil toxicity in soil and *Vecia Faba L.* plant // Plant Archives. 2018. V. 18. No. 2. P. 2573-2579
15. Casseils N.P., Lane C.S., Depala M., Saeed M., Craston D.H. Microtox testing of pentachlorophenol in soil extracts and quantification by capillary electrochromatography (CEC) - A rapid screening approach for contaminated land // Chemosphere. 2000. V. 40. No 6. P. 609-618. doi: 10.1016/S0045-6535(99)00322-7
16. David M., Levente K., Sandor A. P., Zsolt K. Applying Bioassays for Investigation of Soils from Suburban Green Sites // CSEE'20. Virtual Conference. 2020. No. ICEPTP 108. P. 1-6. doi: 10.11159/iceptp20.108
17. Marlon E.V., Juan G.F., Francisco P.M. Determination of phytotoxicity of soluble elements in soils, based on a bioassay with lettuce (*Lactuca sativa L.*) // Science of The Total Environment. 2007. V. 378. No. 1-2. P. 63-66. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.01.007
18. Persoone G. Recent new microbiotests for cost-effective toxicity monitoring: the Rapidtoxkit and the Phytotoxkit // 12th International Symposium on Toxicity Assessment - Book of Abstracts, 2005, p. 112.
19. Plaza G., Nalęcz-Jawecki G. The application of bioassays as indicators of petroleum-contaminated soil remediation // Chemosphere. 2005. V. 59. No. 2. P. 289-296. doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.11.049
20. Susanna S., Laura O., Aldo V. Application of Biotests for the Determination of Soil Ecotoxicity after Exposure to Biodegradable Plastics // Frontiers in Environmental Science. 2016. V. 4. Art. 68. P. 1-12. doi: 10.3389/fenvs.2016.00068
21. Toyama Prefecture. The Itai-itai Disease museum. URL: <https://www.pref.toyama.jp/1291/kurashi/kenkou/iryuu /1291/Russia/index.html> (датаобращения 20.11.2021)

К ВОПРОСУ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ

О.Н. Зуб

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет». E-mail: geokub@bk.ru

Нефтяные углеводороды на сегодняшний день представляют из себя одни из самых распространенных загрязнителей окружающей среды. Необходимо отметить факт того, что каждый год в результате добычи и транспортировки добываемой в мире нефти уровень ее потери составляет от 2 до 8%, при этом объем попадающей в окружающую среду нефти составляет от 10 до 20 миллионов в год. Вопросам изучения представленной темы исследования посвящено достаточно много работ отечественного и зарубежного авторства. Несмотря на это, ввиду исключительной многоаспектности темы, многие вопросы, связанные с оценкой опасности углеводородного загрязнения дисперсных грунтов в целом, и песчаных грунтов в частности, до сих пор остаются слабо изученными, и достаточно много публикаций посвящено изучению загрязнения водных сред и почвенного горизонта [1].

В аспекте влияния эколого-геологического фактора на углеводородное загрязнение песчаных грунтов необходимо отметить, что основная опасность углеводородного загрязнения грунтов заключается в нарушении динамического равновесия в сложившихся эколого-геологических системах. Очевидным является тот факт, что углеводородные загрязнения могут повлиять на полный комплекс морфологических, физических, а также физики-химических и биологических свойств грунтов, которыми определяются экологические функции литосферы в пределах распространения ареола загрязнения. Так, к примеру, в работах авторов, посвятивших свои исследования данной теме, приводится оценка трансформации экологических функций литосферы под влиянием углеводородного загрязнения дисперсных грунтов, где свойства грунтов, являются одним из определяющих факторов при определении эколого-геологической обстановки территории [2].

Стоит отметить, что из всех грунтов большему загрязнению подвержены именно песчаные грунты. Данный факт является следствием того, что данный вид грунта наиболее широко распространен на территориях нефтегазовой промышленности, а также имеет свое активное использование при технологическом обустройстве кустовых площадок нефтедобывающих скважин. Помимо этого, большая часть нефтегазовых шламов представлено, как правило, песчаным грунтам. Наряду с этим, песчаные грунты подвергаются большому воздействию углеводородных факторов и в населенных пунктах. Это связано с тем, что данный вид грунта имеет высокую проницаемость, где в геологическом разрезе территории именно толщи песчаных грунтов являются основными каналами миграции, образовавшихся при авариях или систематических утечках, линз углеводородов.

Несмотря на немаловажность и высокую актуальность темы представленного исследования, на сегодняшний день отсутствует точная статистика, которой бы определялся уровень существующего объема загрязненных песчаных грунтов. Имеется только ориентировочное значение, составляющее порядка 600 млн м³ нефтяных шламов. Необходимо отметить, что загрязненный нефтью песок имеет третий класс опасности, исходя из чего, отходы данного класса опасности нельзя размещать на специализированных полигонах, а должны подвергаться переработке. При этом территории распространения загрязненных углеводородами песчаных грунтов должны подвергаться рекультивации. Также необходимо отметить, что и целостной программы переработки загрязненных углеводородами песков в стране не разработано [3].

Прямое прогнозирование влияния углеводородного загрязнения на свойства песчаных грунтов является достаточно сложным процессом, так как большое значение имеет не только степень загрязнения, но и гранулометрический и минеральный состав грунтов, с одной стороны, и состав, свойства самой нефти, с другой стороны.

Углеводородные загрязнители сорбируются грунтами преимущественно еще в жидкой фазе. О сорбции нефти и нефтепродуктов грунтами не существует единого мнения. Преимущественно происходит сорбция полярных компонентов нефтяных веществ, а далее – неполярных компонентов. Способность углеводородов сорбироваться песчаными грунтами повышается в последовательности:

парафины – циклопарафины – ароматические углеводороды – олефины. Количество сорбированных жидких углеводородов в единице объема грунта зависит от общего свободного объёма капилляров, то есть от гранулометрического состава и влажности. При взаимодействии с компонентами углеводородных загрязнителей происходит модификация поверхности кремнезёма, слагающего основную часть песчаных грунтов. Химические свойства таких поверхностно-модифицированных (загрязнённых) песков будут определяться природой сорбированных компонентов нефти, тогда как физико-механические – природой и свойствами исходных песков [4].

Данные изменения имеют существенное влияние на все биологические процессы, происходящие в грунте. Все свойства песчаных грунтов имеют ту или иную экологическую значимость, однако такие свойства как плотность, поглотительная способность, кислотно-основные, капиллярные свойства, гидрофизические параметры и прочность могут рассматриваться, на наш взгляд, ключевыми при оценке возможных негативных экологических последствий.

Вследствие нефтяного загрязнения песчаный грунт становится более агрегированным. У загрязнённого песка появляется связность. В результате агрегирования грунта и заполнения пор углеводородным загрязнителем происходит уменьшение порового пространства, при этом загрязнитель вытесняет воздух, находящийся в грунте. При взаимодействии с углеводородами происходит кардинальное изменение микроструктуры грунта, поверхность минералов гидрофобизируется. В результате гидрофобизации грунт теряет способность впитывать и удерживать влагу. Для таких грунтов характерны более низкие значения гигроскопической влажности, проницаемости, максимальной молекулярной влагоемкости. Уменьшение количества гигроскопической влаги свидетельствует о снижении способности загрязнённых грунтов поглощать влагу, как из атмосферы, так и из глубоких слоев грунта, следовательно, нарушается водный режим грунта [5].

Таким образом, основной целью представленной работы являлось изучение эколого-геологических аспектов влияния углеводородного загрязнения на свойства песчаных грунтов. В результате выполненной работы были изучены такие вопросы, как: влияние эколого-геологического фактора на углеводородное загрязнение песчаных грунтов; воздействие углеводородных факторов на нефтегазовых объектах и в населённых пунктах; сложность прогнозирования влияния углеводородного загрязнения на свойства песчаных грунтов; следствия нефтяного загрязнения песчаных грунтов. В заключение необходимо отметить, что представленная тема статьи имеет колоссальную актуальность. На опасность, которая заключается в загрязнении углеводородами песчаных грунтов, должно быть обращено намного большее внимание в аспекте ее изучения со стороны современных исследователей.

Литература

1. *Королёв В. А., Трофимов В. Т. История инженерно-геологического изучения песков в СССР и Российской Федерации // Инженерная геология. 2017.*
2. *Середин В.В. Исследование степени загрязнения углеводородами грунтов территорий нефтегазовых месторождений // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2014.*
3. *Shkareda V.A., Shibalova G.V. Assessment of the possibility of using clay soils contaminated with hydrocarbons for construction purposes // Nature management. 2017.*
4. *Простов С.М., Шабанов Е.А. Электрофизический мониторинг процессов электроосмотической очистки грунтов от нефтезагрязнений на лабораторных установках // Вестник КузГТУ. 2017.*
5. *Burtsev A.A., Maslovskaya E.G., Persiyanova M.V. Influence of the content of petroleum products on the mechanical properties of subsident soils // Modern construction and architecture. 2016.*

ТЕХНОГЕННЫЕ ГРУНТЫ НА ТЕРРИТОРИИ г. ВИТЕБСКА И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ

И.А. Красовская, А.Н. Галкин

Учреждение образования «Витебский государственный университет им. П.М. Машерова», 210038, Беларусь, г. Витебск, Московский пр-т, 33. E-mail: galkin-alexandr@yandex.ru

На поверхности литосферы при проведении различных строительных и горных работ, в результате производственной деятельности человека образуется достаточно большое количество отложений, представляющих собой либо отходы хозяйственной деятельности человека, либо отложения, специально созданные человеком в строительных и производственных целях. Эти образования получили название техногенных грунтов, иногда именуемых антропогенными [3]. Они получили широкое распространение на селитебных территориях, в местах добычи и переработки полезных ископаемых, вдоль линейных сооружений различного назначения, на сельскохозяйственных землях и др. Процесс их образования и накопления с наибольшей интенсивностью происходит главным образом в районах крупных городов и промышленных объектов. Объем техногенных грунтов значителен и постоянно возрастает. К началу XXI в. мировой объем всех разновидностей техногенных осадков достиг 1500 млрд м³ [5].

Не является исключением в этом процессе и территория Витебска – крупного промышленного города (численность населения около 365 тыс. человек), областного центра, расположенного на северо-востоке Беларуси в долине Западной Двины. Здесь распространены следующие виды техногенных грунтов: 1) природные грунты, измененные в условиях естественного залегания; 2) природные грунты, перемещенные с мест естественного залегания в процессе строительной или иной производственной деятельности; 3) антропогенные образования.

К природным грунтам, измененным в условиях их естественного залегания, относятся горные породы, подвергшиеся преобразованиям состояния и свойств физическими, физико-химическими, химическими и биологическими воздействиями в процессе хозяйственной деятельности человека. Причем эти преобразования носят двойственный характер. В одном случае они направлены на улучшение состояния и свойств грунтов, в другом – ведут к ухудшению их характеристик. В геоэкологическом отношении второй случай представляет наибольший интерес.

Наблюдения показали, что ухудшенные по свойствам грунты в Витебске, в основном, формируются в результате изменений их влажностного режима, вызванного процессами подтопления и заболачивания. К примеру, в городе в 2003 г. в возводимом здании жилого дома по Московскому проспекту после двух лет перерыва в строительстве произошла деформация фундаментных стеновых блоков, выраженная в образовании трещин с шириной раскрытия до 50 мм. Обследование несущих конструкций здания позволило установить, что причиной образования трещин в стеновых блоках послужило расструктурирование грунтов основания, вызванное неравномерным обводнением, а, следовательно, различными физико-механическими свойствами супесей, залегающих в основании фундамента [2].

Ухудшение свойств грунтов в городе нередко может происходить и в результате изменения их состава при засолении либо загрязнении неорганическими (тяжелые металлы, минеральные соли и др.) и органическими (нефтепродукты) компонентами.

Источниками загрязнения грунтов неорганическими веществами в городе служат промышленные предприятия и их стоки, объекты теплоэнергетики (котельные), дорожных и коммунальных служб, автомобильный и железнодорожный транспорт и др. Органические загрязнители попадают в грунты чаще всего при разливах горюче-смазочных материалов на АЗС и стоянках автотранспорта.

Наличие в грунтах различных органических и неорганических веществ предопределяет существенные изменения их свойств. При этом следует заметить, что химические соединения различного состава и их количество оказывают разное, порой диаметрально противоположное влияние на свойства грунтов.

Так, например, часто применяемые дорожными и коммунальными службами города легкорастворимые соли (NaCl и др.) при значительной концентрации оказывают дегидратирующее и коа-

гулирующее влияние на глинистые грунты, снижая значения их гигроскопической влажности, максимальной молекулярной влагоемкости, пределов пластичности, и уменьшая показатели их физико-химических свойств. В то же время, присутствие средне- и труднорастворимых солей в грунтовых массивах оказывает значительно меньшее влияние на свойства грунтов.

При загрязнении дисперсных грунтов нефтью происходит изменение их гранулометрического состава: при добавлении в грунт 2,5% нефти наблюдается агрегация глинистых (<0,005 мм) частиц, а при загрязнении 10% нефти, наоборот, происходит диспергация микроагрегатов; при увеличении загрязнения уменьшается плотность глин, в то время как их пластичность и напряжение сдвига находятся в нелинейной и неоднозначной зависимости [3].

По оценочным данным техногенно-измененные грунты (улучшенные и ухудшенные) занимают около половины всей площади территории Витебска. При этом следует отметить, что площадь застраиваемых земель в городе постоянно увеличивается.

К природным грунтам, перемещенным с мест естественного залегания в процессе строительной или иной производственной деятельности, в пределах города отнесены грунты насыпей и отвалов. Первые образуются при возведении разнообразных земляных сооружений, транспортном строительстве и т.д. Они слагают насыпи, площадки, используются для создания грунтовых подушек. Состав грунтов, как правило, определяется в зависимости от инженерно-строительных задач. Для отсыпки используются крупнообломочные, песчаные и глинистые грунты.

Вторые – формируются на территории города в результате извлечения в ходе земляных работ из горных выработок при новом строительстве, сносе и реконструкции различных зданий и сооружений, прокладке коммуникаций, многочисленных планировочных работах. Это так называемые непланимерно отсыпанные массивы техногенных грунтов или строительные отвалы. Они имеют площадное распространение, связаны, как правило, с развитием городского строительства и занимают различные понижения рельефа (овраги, балки, болота и т.д.). При этом размеры площадей насыпных грунтов и их мощности определяются природным рельефом. Их состав зависит от состава отсыпаемого строительного мусора и литологии местных или привозных грунтов, перемещаемых в отвал.

Так, к примеру, при ликвидации последствий оползня в овраге Дунай по ул. Правды в августе 2006 года, когда за очень короткое время образовалась выемка глубиной 18–20 м и шириной до 50 м, ее засыпка 2,5 тыс. м³ скальной породы (доломита) позволили избежать катастрофической ситуации, связанной с устойчивостью высотного здания [2].

По строению техногенные грунты строительных отвалов неоднородны, сортировка материала в них отсутствует. В результате переотложения меняется дисперсность грунтов. Это может происходить либо из-за привноса более крупного материала, либо из-за относительной потери тонкодисперсного материала. Даже если примесь строительных отходов отсутствует, дисперсность может уменьшиться из-за распыления тонкого и легкого материала при разработке и перевозке местного природного грунта, а также возможных эрозионных и суффозионных процессов в отсыпанном массиве.

Особого внимания заслуживают *антропогенные образования* или *техногенные грунты*, созданные как отходы хозяйственной деятельности человека. Среди них на территории города можно выделить: 1) намывные промышленные отходы (гидроотвалы), 2) насыпные коммунальные отходы (полигоны, свалки), 3) грунты культурного слоя.

Первые представлены *гидрозолоотвалом* Витебской тепловой электростанции, который был заложен еще в 1954 г. на западной окраине города в полукилометре от ТЭЦ и предназначенный для складирования золы и шлака от сжигания твердого топлива, главным образом торфа. На протяжении 25 лет на золоотвале было складировано порядка 2,0 млн т золы. В настоящее время северо-восточная секция золоотвала практически не используется, за исключением крайней юго-восточной ее части, занятой под гаражи и автостоянку. Центральная секция золоотвала большей частью освоена под производственную зону, в пределах которой размещено несколько предприятий. Юго-западная секция гидрозолоотвала частично используется Витебской ТЭЦ в качестве шламоотвала для складирования опасных отходов. Только за период с 1989 по 2010 годы здесь было складировано около 100 т отходов (шлак котельных, отработанный сульфуголь и ионообменная смола, шлам химической водоочистки) [6].

Территория гидрозолоотвала представляет собой выровненную поверхность с перепадом высот менее 2 м. Мощность зольной толщи составляет 5–8 м. Сверху толщина перекрыта насыпными перемешанными песчано-супесчаными грунтами с примесью золы и разнообразных отходов. Их

мощность составляет 0,2–1,7 м. Снизу зольная толща подстилается плотными суглинками и глинами, являющимися водоупором. Зола обводнена. Грунтовые воды устанавливаются на глубине от 0,7 до 2,9 м от поверхности золоотвала, межпластовые воды сожского горизонта залегают на глубинах более 12 м.

Состав золы весьма неоднороден. Он зависит от состава минеральной части топлива, его теплотворной способности, режима сжигания, места отбора из отвалов и др. По данным В.С. Хомича и др. [6], в грунтах гидрозолоотвала содержатся органическое вещество, нефтепродукты, полициклические ароматические углеводороды (антрацен, аценафтен, бензо(а)антрацен, бензо(а)пирен, бензо[*g,h,i*]перилен, бензо(б)флуорантен, дибензо[*a,h*]антрацен, нафталин, пирен, флуорен, фенантрен, флуорантен, хризен), тяжелые металлы и другие вещества.

Так, содержание органического вещества в золе изменяется от 4,3 до 49,0% (при среднем значении 20,9%), нефтепродуктов – от 9,4 до 1871,2 мг/кг (219,7 мг/кг), полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) – от 1,6 до 12,9 мг/кг, при среднем их содержании 2,8 мг/кг. Следует заметить, что в структуре ПАУ преобладают летучие низкомолекулярные соединения, на долю которых в грунтах золоотвала приходится 95%. При этом основной вклад в суммарную долю ПАУ вносит нафталин, содержание которого в золе составляет 30%.

Кроме того, для соединений ПАУ установлена тенденция увеличения содержания вниз по разрезу золоотвала, что связано, по всей вероятности, с радиальными миграционными потоками соединений ПАУ и мелкодисперсным составом золы.

Валовое среднее содержание тяжелых металлов в золе составляет: хрома – 41,6 мг/кг (пределы содержания 23,3–54,6 мг/кг), кадмия – 1,0 (0,6–1,3), свинца – 13,2 (5,1–24,4), меди – 20,7 (9,4–36,2), никеля – 27,0 (14,6–95,3) и цинка – 50,0 (10,8–118,0) мг/кг. По сравнению с местным педогеохимическим фоном зола обогащена хромом в среднем в 1,2 раза, кадмием – 3,0, свинцом – 1,8, медью – 4,6, никелем – 5,7, цинком – в 2,3 раза [6].

Сильная обводненность, высокое содержание различных химических веществ в гидрозолоотвале ставят его в разряд потенциального источника загрязнения подстилающих зольную толщу грунтов, а также поверхностных и подземных вод, находящихся в зоне влияния золоотвала.

Наряду с пестротой состава зольных грунтов наблюдается высокая их неоднородность по физическим и физико-механическим свойствам, в частности, по плотности, коэффициенту пористости, определяющим водоудерживающую способность, деформационно-прочностным свойствам – удельное сцепление, угол внутреннего трения, модуль деформации могут варьировать в широком диапазоне значений (табл. 1–3), в связи с чем использование данных грунтов в инженерно-строительных и других хозяйственных целях весьма ограничено.

Таблица 1.

Физические свойства грунтов гидрозолоотвалов Витебской ТЭЦ (по [2])									
Грунт	Статистические показатели	Влажность, %	Плотность, г/см ³			Степень влажности, д.е.	Пористость, %	Коэффициент пористости, д.е.	Коэффициент фильтрации, м/сут
			естест. влажн.	скелета	твердой компон.				
Зола	n	19	8	7	14	7	7	7	4
	min	37	0,86	0,50	2,24	0,5	62	1,66	0,2
	max	137	1,50	1,03	2,76	1,0	81	4,46	0,3
	x	81	1,19	0,72	2,56	0,7	72	2,93	0,25

Насыпные техногенные грунты полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО) в пределах Витебска и его окрестностей имеют ограниченное распространение. Наибольший их массив расположен в 1 км от восточной окраины города, размещен он на площади 32 га, высота наслоений массива в отдельных местах превышает 30 м (рис. 1). В среднем за год на полигон свозится более 100 тыс. т отходов.

Таблица 2.							
Основные показатели прочностных свойств зольных грунтов Витебской ТЭЦ (по [2])							
Грунт	Глубина, м	Сдвигающие усилия τ_j , 10^5 Па при нагрузках 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 $\times 10^5$ Па				Удельное сцепление c , 10^5 Па	Угол внутр. трения ϕ , град.
		τ_1	τ_2	τ_3	τ_4		
Зола обводненная (продукт сгорания каменного угля)	1,4	0,71	0,51	1,38	–	0,36	34
	1,4	0,51	0,62	1,17	–	0,18	33
	1,4	0,56	0,71	0,77	–	0,46	12
Зола влажная (продукт сгорания торфа)	1,2	–	1,00	1,43	1,84	0,20	39
	1,2	–	1,12	1,51	1,84	0,40	36

По экспертным оценкам, ведущую роль в их составе играет фракция полимеров (25%). Содержание других фракций, в т.ч. органической, ниже (12%). Заметную роль в составе отходов играет фракция бумаги, картона и гофрокартона (11,5%), а также стекла – 13,3%.

В коммунальных отходах присутствуют различные по составу, классам опасности и свойствам вещества, часто в аномальных концентрациях, претерпевающие в ходе функционирования полигона интенсивные и длительные воздействия физической, химической и биохимической природы.

Со временем состав наслоений в массиве меняется: содержание органической составляющей уменьшается, а количество инертных материалов (стекла, пластика, минеральной части грунтов) возрастает.

Таблица 3.						
Результаты испытаний зольных грунтов Витебской ТЭЦ (по [2])						
Грунт	Глубина, м	Площадь штампа F , cm^2	Расчетный интервал давления P_0-P_n , МПа	Осадка в расчетном интервале давления S_0-S_n , см	Давление, Мпа Полн. осад. шт., см	Модуль деформации E , МПа
Зола (продукт сгорания каменного угля)	1,2	5000	0,30–0,025	4,221–0,566	0,35 / 4,96	4,5
	3,8	600	0,30–0,10	0,496–0,128	0,50 / 1,05	11
	3,8	600	0,20–0,05	0,146–0,022	0,50 / 1,01	24
Зола (продукт сгорания торфа)	6,0	600	0,125–0,05	0,422–0,089	0,30 / 9,84	4,3
	6,0	600	0,125–0,05	0,804–0,051	0,25 / 7,32	2

В химическом составе техногенных грунтов ТКО преобладают органические вещества и углерод; в небольших количествах (около 1–3,5%) присутствуют азот и кальций; зольность свалочных грунтов составляет 28–41%.

Грунты Витебского полигона ТКО, как и других подобных объектов, отличаются неоднородностью состава, сложения и свойств как по разрезу, так и по простиранию, что обусловлено составом и размерами включений, а также временем их отсыпки. Они характеризуются высокой влажностью (20–60%) и пористостью (60–70%). Плотность их изменяется в пределах от 0,6–0,8 до 1,6 г/см³ [2]. Отмечается увеличение плотности во времени по мере их слеживания, с глубиной она возрастает тем больше, чем больше мощность слоя отсыпанного отхода.

Грунты полигона ТКО отличаются высокой сжимаемостью, медленным протеканием процессов самоуплотнения, значительной изменчивостью и анизотропией свойств.



Рис. 1. Разросшаяся свалка твердых коммунальных отходов в окрестностях Витебска (по [2]).

Свалочные грунты, как правило, взаимодействуют с воздухом и водой. Протекающие при этом процессы обуславливают выделение тепла и образование новых твердых, жидких и газообразных веществ, часть из которых в виде газообразных соединений и фильтрата выносятся из массива, загрязняя при этом грунты, поверхностные и подземные воды, находящиеся в зоне влияния полигона ТКО. Как показали наши исследования, фильтрат, образующийся в основании свалки содержит высокие концентрации хлоридов, аммонийного азота, натрия, калия, кадмия, никеля, хрома и свинца, в разы превышающие предельно-допустимые концентрации.

Грунты культурного слоя – одни из типичных и распространенных антропогенных образований в Витебске. По составу и свойствам они резко отличаются от нижележащих природных грунтов. В культурном слое города встречаются разнообразные остатки: битый кирпич и камень, остатки древесины, строительный мусор, глиняные черепки, предметы домашнего обихода. Его мощность колеблется в широких пределах (рис. 2): от нескольких десятков сантиметров до 12–15 м, и зависит от времени и продолжительности хозяйственного освоения территории, рельефа местности и др. [2].

Культурный слой Витебска характеризуется своеобразным неоднородным составом, причем резкая неоднородность грунтов культурного слоя прослеживается как по вертикали, так и в горизонтальном направлении. Археологические раскопки древнего Витебска и наблюдения за слоями во время изыскательских и строительных работ, проводимые с 1963 г., позволили расчленить культурный слой исторического центра города на несколько горизонтов (табл. 4), датировка которых основана на анализе встречающейся керамики (так называемого массового археологического материала) [1, 4].

Наиболее древние отложения – *стратиграфический слой 1* – представляют собой спрессованный слой коричневого цвета, образовавшийся в результате разрушения органических остатков (дерево). Мощность его колеблется от 0,1 до 0,4 м. Среди находок древнейшего слоя наряду с обломками тиглей для плавки и каменными формами для отливки цветных металлов отмечены шлаки.

Стратиграфический слой 2 светло-серой окраски с примесью песка мощностью от 0,04–0,1 до 0,2–0,45 м. В слое содержатся обломки тиглей и шлаки.

Стратиграфический слой 3 черной окраски мощностью от 0,4–0,8 до 1,6–1,9 м. Хронологически в нем выделяется два периода. Для раннего времени характерны черные, рыхлые по структуре, напластования, содержащие уголь и золу. От слоя 2 он отделен линзами голубой вязкой глины.

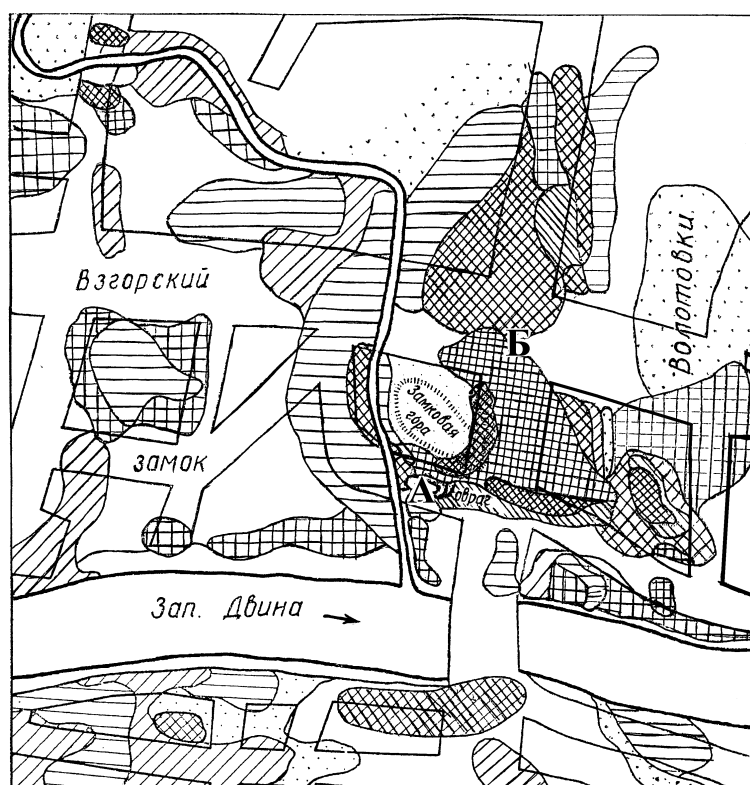


Рис. 2. Распределение мощности культурного слоя в исторической части Витебска (по [4]):
А – Верхний замок, Б – Нижний замок.

Таблица 4.			
Стратиграфия культурного слоя Нижнего замка Двинской возвышенности в историческом центре Витебска (по [1])			
№ слоя	Характеристика слоя	Строительный период	Датировка
1	Коричневый, заторфованный	–	VI–VIII вв.
2	Светло-серый, опесчаненый	–	IX – начало XI вв.
3	Черный: а) нижний период – перемешан с золой;	I	начало X – первая половина XII вв.
	б) верхний период – без примесей, рыхлый	II–III	середина XI – первая половина XIII вв.
4	Темно-серый: а) первый период – спрессованный со щепой и навозом (коричневый);	IV–VII	Середина XIII–XIV вв.
	б) второй период – темно-серый, рыхлый, без примесей;	VIII	XV–XVI вв.
	в) третий период – темно-серый, рыхлый, со щепой	IX–XIV	XVII–XVIII вв.

Такие линзы характерны и для верхней части этого слоя. Толщина слоя в разных местах раскопов составляет от 0,1–0,3 до 0,5–0,7 м. В отдельных местах слой пререзает прослойка коричневой окраски мощностью 0,3–0,6 м, состоящая из спрессованного навоза, щепы и травы. Сверху слой раннего периода перекрыт мелкими пережженными камнями, мощной прослойкой извести, включающей мелкие камни, битую плитку, куски глины.

Слой позднего периода черного цвета, рыхлый по структуре; мощность его изменяется от 0,2–0,4 до 0,9–1,2 м, содержит крайне мало примесей. Последние сконцентрированы в виде отдельных

прослойка, иногда довольно значительных по мощности (0,2–0,4 м). Во многих местах напластования этого слоя прорезает мощная прослойка (до 0,3 м) обугленной древесины – последствия пожара.

Стратиграфический слой 4 отличается от предыдущего несколько более светлой окраской, поэтому он условно обозначен как стратиграфический слой темно-серого цвета. Мощность его колеблется от 1,7–1,8 до 2,2–2,4 м. При этом следует отметить, что цифровые показатели толщины слоя весьма условны, поскольку верхняя его часть сnivelирована в результате строительной деятельности в XIX–XX вв. По всевозможным примесям и, в первую очередь, по содержанию щепы и структуре, внутри напластований темно-серой окраски можно вычленивать три больших периода. Такое членение подтверждается датировкой вещевого материала, содержащегося как в слое, так и в строительных периодах. Для четвертого стратиграфического слоя характерно высокое содержание спрессованной щепы, особенно в нижней его части, отчего он получил коричневый оттенок. Вверх по разрезу коричневые напластования сменяются рыхлыми опесчаненными слоями серого цвета, с различным содержанием щепы.

Обобщая приведенные данные по строению толщ культурного слоя, можно констатировать, что в пределах города явно выделяются два типа (органо-минеральный гумусоаккумулятивный и органический «торфообразный») и три подтипа культурного слоя: времени возведения сооружения, периода функционирования (обживания) и времени разрушения. Считается, что их образование предопределено характером формирования культурного слоя, который обуславливает степень однородности его состава, строения и свойств.

Проведенные нами исследования с привлечением фондовых материалов по инженерно-геологическим изысканиям в исторической части Витебска позволили выделить в ее пределах два литологических горизонта культурного слоя [2]. Первый – песчаный, мощностью 4–7 м, сложенный преимущественно мелкими и пылеватыми песками со строительным мусором (битый кирпич, куски арматуры, отдельные валуны и др.), который датируется XIX–XX веками; второй – глинистый, мощностью 2,5–6,5 м, заторфованный, с остатками слабо разложившейся древесины, с песчаными линзами и прослойками, сформированный по археологическим данным на протяжении нескольких веков.

Песчаные грунты культурного слоя слаболигифицированы, естественная влажность их 13–20%, преимущественно рыхлого и среднеплотного сложения (1,77–1,94 г/см³); коэффициент пористости песков в среднем составляет 0,75, коэффициент фильтрации – 0,95 м/сут, угол естественного откоса в сухом состоянии варьирует в пределах 37–43°, под водой – 28–30°.

Глинистые грунты культурного слоя отличаются весьма неоднородными свойствами: естественная влажность их изменяется в пределах от 10 до 117% и выше; плотность – от 0,97 до 1,89 г/см³, коэффициент пористости – от 0,68 до 3,58, число пластичности – от 5 до 24%. Относительное содержание органического вещества в них варьирует от 0,06 до 0,41. Консистенция грунтов изменяется от твердой до текучей; водопроницаемость их благодаря глинистому составу и наличию органики низкая (0,01–0,001 м/сут). Прочностные показатели в среднем составляют: сцепление $0,22 \times 10^5$ Па, угол внутреннего трения 25°, коэффициент внутреннего трения 0,457. По деформационным характеристикам глинистые грунты культурного слоя являются повышенно сжимаемыми и деформируемыми грунтами – по данным компрессионных испытаний в диапазоне нагрузок 0,1–0,2 МПа их коэффициент сжимаемости изменяется от $0,050 \cdot 10^{-5}$ до $0,324 \cdot 10^{-5}$ Па⁻¹, а модуль деформации варьирует в интервале значений от 0,30 до 1,00 МПа при среднем значении 0,60 МПа [2].

Следует заметить, что, несмотря на то, что по существующим строительным нормам грунты культурного слоя считаются слежавшимися, процессы уплотнения в них еще не завершились. Учитывая высокую неоднородность состава и строения грунтов культурного слоя, следует предполагать большую изменчивость свойств, что представляет опасность для строительства и реконструкции зданий и сооружений.

В заключение отметим, что распространение, состав и свойства техногенных грунтов на территории Витебска требуют дальнейшего тщательного изучения специалистами разного профиля на основе детальной инженерно-геологической съемки.

Литература

1. Бубенько Т.С. *Средневековый Витебск. Посад–Нижний замок (X–первая половина XIV в.). Витебск, Изд-во ВГУ им. П.М. Машерова, 2004.*

2. Галкин А.Н. Инженерная геология Беларуси: в 3 ч. Ч.1: Грунты Беларуси. Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова, 2016. URL: <https://rep.vsu.by/handle/123456789/8608> (дата обращения: 15.10.2021).
3. Галкин А.Н., Акулевич А.Ф., Павловский А.И., Галезник О.И. Техногенные грунты. Минск, Высшая школа, 2020.
4. Левко О.Н. Витебск XIV–XVIII вв. (Стратиграфия, хронология, социально-историческая топография и технология производств). Минск, Наука и техника, 1984.
5. Передельский Л.В., Приходченко О.Е. Инженерная геология. Ростов н/Д, Феникс, 2009.
6. Хомич В.С., Городецкий Д.Ю., Овчарова Е.П., Рыжиков В.С., Савченко С.В., Бокая Г.М., Курман П.В. Золоотвалы ТЭЦ как потенциальные источники загрязнения окружающей среды // Природопользование. Вып. 21. 2012, с. 124–135.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ТВЕРДЕНИЯ ГИДРАТИРОВАННЫХ ЗОЛ И ЗОЛОГРУНТОВЫХ СИСТЕМ

Н.А. Ларионова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1. nin.Larionowa@yandex.ru

С увеличением объемов строительства, в том числе дорожного, возрастает потребление строительных материалов. В связи с этим проблема рационального использования, природных ресурсов и вяжущих веществ в настоящее время приобретает особую значимость. Решение этой проблемы может быть основано на разработке технологий с привлечением вторичных минеральных ресурсов, в частности, промышленных отходов, объемы которых с каждым годом увеличиваются. Многие промышленные отходы в результате технологической переработки по своим свойствам зачастую являются уже подготовленным минеральным сырьем и могут использоваться для получения строительных материалов. К числу таких крупнотоннажных отходов относятся золы, образующиеся при сжигании твердого топлива.

В 70-80х годах прошлого столетия во многих организациях в нашей стране и за рубежом проводились активные исследования по использованию зол тепловых станций для получения строительных материалов. Исследованиями установлено, что состав и свойства зол зависят от вида и качества сжигаемого топлива, режима сжигания, способов улавливания и удаления. На основе анализа химического состава, в частности, содержания CaO, золы распределены на три категории: активные, скрыто активные и неактивные. На этой основе определялась область возможного их применения в строительстве.

Разработки Таллиннского политехнического института установили возможность использования зол Прибалтийских сланцев в производстве вяжущих и строительных материалов, в частности, сланцезольного высокомарочного цемента, бетонов, автоклавных изделий (газобетона, тяжелого мелкозернистого бетона). Такие разработки позволили существенно сократить себестоимость их производства. В дальнейшем подобные исследования продолжены в организациях Новосибирска, Екатеринбурга по оценке возможности использования бурого угольных зол (КАУ) для получения строительных материалов.

К группе активных относятся золы сухого удаления, образующиеся от сжигания горючих сланцев, бурого угля Канско-Ачинского угольного бассейна (КАУ) и некоторых торфов. Они отличаются повышенным содержанием CaO (20,0-60,0%), в том числе CaO_{своб.}, 6,0-30,0%, присутствием клинкерных минералов, что предопределило возможность их использования для укрепления грунтов при устройстве конструктивных слоев дорожных одежд. Ранее проведенными исследованиями установлена возможность и целесообразность использования активных зол для укрепления грунтов для дорожного строительства в качестве самостоятельного вяжущего. Их применение позволяет получать строительный материал с заданными свойствами. При этом обеспечивается сокращение расхода традиционных вяжущих веществ – цемента и извести.

Активные золы – многокомпонентные и многофазные материалы, обладающие вяжущими свойствами. Изменению химико-минерального состава зол и выявлению факторов, влияющих на их способность к самостоятельному твердению, уделялось большое внимание в исследованиях Е.А. Галибиной, В.Х. Кикаса, М.А. Савинкиной, А.Т. Логвиненко и других. Установлено, что золы отличаются по дисперсности, химико-минеральному составу и показателей гидравлической активности. Показатели дисперсности и химико-минерального состава зол взаимосвязаны. С увеличением дисперсности повышается содержание SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃ и активных клинкерных минералов, но снижается количество извести, в том числе и CaO_{своб.} Наряду с этим повышается присутствие стекловидной фазы до 32,90-38,20%, состоящей из алюмоферритов и ферритов кальция.

К активным золам, используемых для укрепления грунтов, предъявляются определенные требования по содержанию в их составе CaO_{своб.} (не менее 8,0%) и сернистых и сернокислых соединений (в пересчете на SO₃) – не более 6,0%. Величина удельной поверхности должна быть не менее 3000,0 см²/г [6].

Большинство исследований проводилось по использованию активных зол для укрепления песчаных грунтов с целью определения оптимальных дозировок вяжущего и получения материалов для дорожного строительства, отвечающих требованиям нормативных документов. Но ограничены сведения по укреплению глинистых грунтов золами, недостаточно изучены процессы твердения и структурообразования зологрунтовых смесей в зависимости от состава используемых грунтов и зол.

В связи с этим целью настоящих исследований являлась сравнительная оценка влияния особенностей состава зол и их гидравлической активности на процессы твердения при их использовании для укрепления глинистых грунтов.

Сравнительная оценка влияния химико-минерального состава зол на процессы твердения и структурообразования материалов, и изменение их физико-механических свойств во времени проводилась с использованием в качестве самостоятельного вяжущего сланцевых зол Прибалтийской ГРЭС, Сызранской ТЭЦ и торфяной золы, отобранной с Лидской ТЭЦ. Исследованные золы отличались по дисперсности и химико-минеральному составу.

Сланцевая зола Прибалтийской ГРЭС высокодисперсная с $S_{уд.}=4500 \text{ см}^2/\text{г}$. В ее гранулометрическом составе преобладающей является фракция размером 0,05-0,01 мм, содержание которой составляет 77,68%. Частицы размером <0,01 мм присутствуют в количестве 8,0-8,5% [3].

В ее составе присутствуют активные клинкерные минералы в количестве: $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) – 15,54%; C_3A ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) – 3,61%; C_2F ($\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) – 5,38%. Количество стекловидной фазы в золе составляет 27,37%, а нерастворимого остатка – 18,32% [4]. Зола отличается высоким содержанием SO_3 (10,78%) (табл. 1).

Таблица 1.							
Химический состав исследованных зол							
Место отбора зол	Содержание компонентов, %						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	$\text{CaO}_{\text{своб.}}$	MgO	SO_3
Сланцевые золы							
Прибалтийская ГРЭС	29,59	8,35	3,59	30,06	6,64	2,94	10,78
Сызранская ТЭЦ	42,46	11,85	7,50	27,43	4,19	1,70	5,64
Зола торфяная							
Лидская ТЭЦ	28,50	3,80	14,20	37,70	17,70	4,20	3,30

Зола Сызранской ТЭЦ среднезернистая с $S_{уд.}=2700 \text{ см}^2/\text{г}$. Преобладающей является фракция размером 0,25-0,05 мм, количество которой составляет 66,0-68,0%, а частиц размером 0,05-0,01 мм содержится в 2,8 раза меньше, чем в золе сланцев Прибалтийского бассейна [6]. Золы приволжских сланцев относятся к гипсовому виду. Они отличаются повышенным содержанием $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ и относительно меньшим присутствием клинкерных минералов: $\beta\text{-C}_2\text{S}$ – 10,35%; CS – 3,2%; C_2F – 4,61%; C_3A – 5,4%. Количество сланцевого стекла достигает 31,25%, а нерастворимого остатка – 19,58%. Содержание серы в золах составляет 5,0-6,0%, но может достигать 19,0% за счет гипса и ангидрита. Также сера находится в составе сложных органических соединений, и может быть представлена реакционно-способными формами, что обусловлено особенностями состава сланцев. Сера в сланцах этого месторождения присутствует в различных формах в количестве: $S_{\text{пирит.}}$ – 0,36%, $S_{\text{сульфид.}}$ – 0,87%, $S_{\text{орг.}}$ – 2,63%, поступающих в золы и влияющих на их свойства [7].

Торфяная зола Лидской ТЭЦ циклонная, ее удельная поверхность составляет 2,600 $\text{см}^2/\text{г}$. Преобладающей является фракция размером 0,5-0,05 мм, содержание которой может достигать 89,0%. В составе минеральной части присутствуют кварц, магнезит, кальцит. Зола высококальциевая с содержанием CaO – 37,70%, в том числе $\text{CaO}_{\text{своб.}}$ – 17,70%. Она отличается небольшим присутствием Al_2O_3 и SO_3 (3,30%). В составе золы среди клинкерных минералов присутствуют $\beta\text{-C}_2\text{S}$, CA , C_2F , ранкинит ($\text{C}_3\text{S}_2\text{O}_7$), браунмиллерит [2].

В качестве объектов укрепления использовались моренные отложения, отобранные на территории Московской области (gIIм), залегающие непосредственно с поверхности и подверженные процессу подзолистого почвообразования.

1. Грунт – легкий моренный суглинок ($I_p=14$) содержал частиц <0,005 мм 11,0% и небольшое количество органических веществ (0,12%).

2. Тяжелый моренный суглинок ($I_p=16$) содержал частиц <0,001 мм – 27,80%, органических веществ (0,57%) и отличался обменной ($K_{обмен.}$ 3,49 мг-экв/100 г грунта) и гидролитической кислотностью ($K_{гидр.}$ – 6,82 мг-экв/100 г грунта).

Исследования кинетики процесса твердения гидратированных зол и зологрунтовых смесей проводились на образцах, приготовленных при оптимальной влажности и нагрузке уплотнения 3,0 МПа, твердевших в воздушно-влажных условиях. Золы добавлялись в грунты в количестве 30,0-40,0% на 100 г смеси. Определения фазового состава новообразований и концентрации компонентов в поровом растворе проведены на основе рентгеноструктурного и химического анализов. Количество $CaO_{своб.}$ определялось этилглицератным методом, а несвязанной SO_3 – методом Гудович.

Предпринята попытка оценить гидравлическую активность зол не только по присутствию извести в их составе, но и по расчетным показателям на основе химического анализа: модулю основности $M_o = \frac{CaO+MgO+Na_2O+K_2O}{SiO_2+Al_2O_3}$, коэффициенту качества $K_k = \frac{CaO+MgO+Al_2O_3}{SiO_2+TiO_2}$ и соотношению окислов CaO/SiO_2 . Меньшими значениями этих показателей отличается сланцевая зола Сызранской ТЭЦ (табл. 2).

Таблица 2.				
Расчетные показатели гидравлической активности зол				
Наименование зол и место отбора	CaO/SiO ₂	M _o	K _k	SO ₃
Сланцевая зола Прибалтийской ГРЭС	1,02	0,97	1,38	10,78
Сланцевая зола Сызранской ТЭЦ	0,65	0,58	0,95	5,64
Торфяная зола Лидской ТЭЦ	1,31	1,29	1,46	3,30

Гидравлическая активность зол зависит не только от содержания $CaO_{своб.}$, но и от количества и соотношения клинкерных минералов, гидратационная активность которых снижается в ряду $C_3A > C_4AF > C_3S > C_2S$. Находясь в жидкой фазе, они оказывают влияние на интенсивность процесса гидратации других минералов. Так, C_3A способен ускорить процесс гидролиза C_3S и C_2S за счет связывания $Ca(OH)_2$.

Сравнительный анализ процессов твердения гидратированных зол и зологрунтовых смесей позволил отметить общие их особенности, характерные для этих систем: а) замедленный процесс твердения, обусловленный преобладанием в составе зол двухкальциевого силиката ($\beta-C_2S$), отличающегося меньшей гидратационной способностью; б) отсутствие зависимости прочности образцов от содержания $CaO_{общ.}$ в составе зол.

Интенсивность процесса твердения, условия формирования и состав новообразований, упрочняющих зольный камень, контролируются концентрацией свободной извести в зольных и зологрунтовых смесях. В результате ее взаимодействия с компонентами стекловидной фазы зол, концентрации $CaO_{своб.}$ и SO_3 постоянно изменяются во времени. Стекло, содержащееся в 1,0 г золы, при взаимодействии с известково-гипсовым раствором способно поглотить 27,0-57,0 мг CaO и 17,5-27,0 мг SO_3 [1]. В результате гидролиза и гидратации извести и клинкерных минералов в поровый раствор поступает $Ca(OH)_2$. В щелочных условиях ($pH=12,5$) активизируется стекловидная фаза зол, возрастает количество подвижных форм SiO_2 и Al_2O_3 . В результате взаимодействия извести с компонентами стекловидной фазы дополнительно образуются гидросиликаты и гидроалюминаты кальция по типу пуццолановой реакции.

Установлено, что наиболее активный рост прочности зольных и зологрунтовых образцов отмечается в течение первых 28 суток твердения. В результате гидролиза и гидратации извести и клинкерных минералов, активизации сланцевого стекла в щелочных условиях, происходит образование

гидросиликатов ($C_3S_2H_2$, C_2SH_3 , C_2SH) и гидроалюминатов кальция (C_3AH_2 , C_3AH_{12}), упрочняющих зольный камень. Присутствие алюмината кальция (C_3A) и его взаимодействие с SO_3 способствует активному образованию гидросульфалюмината кальция – этtringита ($C_3AG_3H_{31}$). Этtringит среди новообразований выполняет двойную роль. На ранних стадиях твердения способствует повышению прочности материалов, а на более поздних, в результате его раскристаллизации, увеличению объема образцов, разуплотнению их структуры и снижению прочности.

Образцы на основе сланцевой золы Прибалтийской ГРЭС отличались повышенной прочностью на всех сроках испытаний. Это связано с ее дисперсностью, повышенным содержанием клинкерных минералов и показателями гидравлической активности: соотношением CaO/SiO_2 , (1,1-1,3), $M_o > 1$ и $K_k = 1,4$ (табл. 2, 3).

Таблица 3.					
Изменение прочности гидратированных зол во времени					
Исследованная зола и место отбора	Содержание $Ca_{O_{своб.}}$ %	Прочность при сжатии, МПа			
		Время твердения, сутки			
		28	90	180	360
Сланцевая зола Прибалтийской ГРЭС	6,64	7,20	9,80	12,30	13,60
Сланцевая зола Сызранской ТЭЦ	4,19	8,80	8,50	7,60	5,00
Торфяная зола Лидской ТЭЦ	17,70	3,50	5,10	7,10	9,40

В период 90-180 суток прочность повышается, но с меньшей интенсивностью, что связано с понижением концентрации $CaO_{своб.}$ в поровом растворе. В зольных образцах основная часть извести расходуется на образование гидросиликатов, гидроалюминатов кальция и этtringита. Присутствие в составе золы C_3A способствует его образованию в течение первых 7-28 суток. За 90 суток на образование этtringита расходуется около 6,2% свободной извести. За этот период в результате поглощения извести сланцевым стеклом, ее концентрация снижается до 0,48%, а $SO_{3_{несв.}}$ – до 4,5-4,8% [4]. В образцах протекают разнонаправленные процессы. Кристаллические новообразования обеспечивают повышение их прочности, но активный рост крупных кристаллов этtringита способствует увеличению объема образцов, повышению пористости, коэффициента линейного расширения до 2,62-2,91% и разуплотнению структуры. Рост прочности замедляется, а в определенных условиях, за счет активной раскристаллизации этtringита, возможно и ее снижение.

Аналогичные процессы протекают в образцах на основе сланцевой золы Сызранской ТЭЦ, но на более ранней стадии твердения. Повышенное содержание C_3A в составе золы определяет активное образование этtringита в течение 7-14 суток. Формирование новообразований ($C_3S_2H_2$, C_2SH_3 , C_2SH , C_3AH_2 , C_3AH_{12}) и этtringита обеспечивают повышение прочности образцов к 28 суткам. При этом существенно снижается концентрация $CaO_{своб.}$ в поровом растворе до 0,25-0,30%, а $SO_{3_{несв.}}$ – до 0,7-0,85%. При этом значительно снижается соотношение $CaO_{своб.}/SO_3$. После 60 суток процесс твердения замедляется, и прочность образцов снижается. Раскристаллизация новообразований вызывает кристаллизационное давление в образцах, происходит увеличение коэффициента линейного расширения до 3,8-4,5%, повышение пористости и разуплотнение их структуры. На отдельных участках в структуре образцов отмечается появление микроусадочных дефектов вокруг зольных частиц (Рис. 1). В совокупности эти процессы приводят к снижению прочности образцов (табл.3).

Образцы гидратированной торфяной золы на ранних стадиях твердения отличаются меньшей прочностью, по сравнению со сланцевыми золами, что связано с ее дисперсностью, меньшим содержанием клинкерных минералов и наличием частиц извести в переобожженном состоянии. Прочная оболочка, находящаяся на известковых частицах, ограничивает активное взаимодействие извести с водой. Этот процесс продолжается во времени, и известь поступает в поровый раствор отдельными порциями. Как и для сланцевых зол, прочность образцов возрастает вследствие формирования гидросиликатов и гидроалюминатов кальция. В связи с низким содержанием SO_3 (3,3%), в зольных образцах на основе торфяной золы образуется небольшое количество этtringита, способ-



Рис. 1. Формирование кристаллических новообразований в гидратированной золе и появление микроусадочных пространств (Фото В.Н. Соколова).

ствующего повышению их прочности на ранних сроках твердения. В отдельные периоды отмечается небольшое разуплотнение структуры, и коэффициент линейного расширения составляет 1,5-2,0%, что в большей степени связано с высоким содержанием $\text{CaO}_{\text{своб.}}$ (17,7%) в составе золы. В структуре образцов отмечается появление микроусадочных пространств вокруг зольных частиц (Рис. 1).

Глинистые грунты представляют собой довольно сложный объект для укрепления различными вяжущими веществами, в т.ч. цементом и известью. По сравнению с песчаными грунтами, при укреплении глинистых грунтов для получения материалов с заданными свойствами требуется больший расход вяжущих. Процесс твердения зологрунтовых смесей имеет определенное сходство с процессами, рассмотренными для гидратированных зол. Также как и для зольных образцов интенсивность процесса твердения, условия формирования и состав новообразований контролируются концентрацией $\text{CaO}_{\text{своб.}}$ и имеет замедленный характер. В грунты с 30,0-40,0% дозировкой зол вносятся меньшее количество извести и активных минералов, что оказывает влияние на прочность образцов. Для зологрунтовых систем процесс твердения также осложняется активным взаимодействием глинистых грунтов, особенно их коллоидной части, с $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В зологрунтовых системах протекает комплекс физико-химических процессов (адсорбция извести глинистыми грунтами и стекловидной фазой зол, активизация ионно-обменных реакций, нейтрализация кислотности, карбонизация), способствующих снижению концентрации извести в жидкой фазе. За 90 суток взаимодействия с известью суглинками поглощается 112,0-124,0 мг-экв. CaO /на 100 г грунта. Интенсивность снижения концентрации извести зависит от состава грунтов, от содержания органических веществ и наличия кислотности. В связи с этим, прочность образцов у зологрунтовых смесей несколько меньше, чем у гидратированных зол (табл.3, 4).

Таблица 4.

Изменение прочности глинистых грунтов, укрепленных активными золами, во времени

№ грунта	Наименование и место отбора зол	Добавка золы, %	Прочность при сжатии, МПа			
			Время твердения, сутки.			
			28	90	180	360
Грунт № 1	Сланцевая зола Прибалтийской ГРЭС [4]	30,0	5,40	7,60	8,20	9,20
		40,0	6,50	8,30	8,60	9,80
	Сланцевая зола Сызранской ТЭЦ	30,0	4,50	4,80	4,80	6,20
		40,0	4,40	5,20	5,40	6,70
Грунт № 2	Торфяная зола Лидской ТЭЦ	30,0	2,40	3,30	4,10	4,60
		40,0	2,50	4,20	4,50	4,80

Прочность зологрунтовых образцов изменяется во времени и повышается с увеличением дозировки зол. На ранних стадиях твердения (7 суток) в результате активного взаимодействия извести с глинистыми грунтами в системах возникают гелеобразные зародыши новообразований. К 28 суткам за счет активизации стекловидной фазы и гидратации клинкерных минералов формируются гидросиликаты и гидроалюминаты кальция различного состава (C_2AH_8 , $C_2S_3H_2$, CAH_{10} , CSH). По аналогии с зольными композициями, в зологрунтах при взаимодействии извести и алюмината кальция (C_3A) с сульфатсодержащими компонентами образуется этtringит ($C_3AS_3H_{31}$), обеспечивающий повышение прочности образцов на ранних стадиях твердения. Его образование возможно не только при взаимодействии алюминатов кальция (C_3A) с гипсом и водой, но и на основе гидроалюминатов кальция.

Наибольшей прочностью на всех сроках твердения отличались образцы грунта, укрепленного сланцевой золой Прибалтийской ГРЭС, причем активный рост прочности отмечается в течение первых 28 суток твердения, что обусловлено ее составом. В этот период при взаимодействии грунта и стекловидной фазы золы с известью происходит образование гидросиликатов и гидроалюминатов кальция различного состава, упрочняющих зольный камень. Наряду с этими соединениями образуется и этtringит.

К 90 суткам твердения прочность образцов повышается, но интенсивность роста ее показателей снижается. В последующие сроки прочность увеличивается только на 1,7-2,5 МПа, по сравнению с предыдущим сроком, что обусловлено значительным снижением концентрации $CaO_{своб.}$ в поровом растворе. Активное взаимодействие глинистого грунта и стекловидной фазы золы с известью и ее сульфатсодержащими компонентами приводит к снижению концентрации $CaO_{своб.}$ до 0,28%, а содержание $SO_{3неcвяз.}$ постепенно уменьшается от 0,90% (90 суток) к 360 суткам до 0,48-0,50%. В результате формирования этtringита и активного роста его кристаллов происходит некоторое разуплотнение структуры образцов. Это обусловлено возникающим кристаллизационным давлением. К 180 суткам увеличивается коэффициент линейного расширения от 1,92% до 2,38%, величина которого к 360 суткам снижается до 1,46%. При этом пористость образцов уменьшается от 41,5% до 33,5% [5].

В условиях возникающего дефицита извести образование высокоосновных новообразований прекращается, происходит преобразование их фазового состава. К 180 суткам отмечается появление низкоосновных гидросиликатов кальция типа CSH , а также гелевидных и рентгеноаморфных соединений, которые концентрируются на поверхности глинистых частиц.

Процесс твердения суглинка, укрепленного золой Сызранской ТЭЦ, протекает аналогично представленной схеме, но прочность образцов ниже, по сравнению со сланцевой золой Прибалтийской ГРЭС. Это обусловлено меньшей ее дисперсностью, содержанием $CaO_{своб.}$ (4,41%) и низкими показателями модуля активности ($M_0=0,6$), коэффициента качества ($K_k=0,97$) и соотношения CaO/SiO_2 (0,65). В результате активного поглощения извести компонентами грунта и сланцевого стекла снижение концентрации $CaO_{своб.}$ отмечается на ранних сроках твердения, и к 28 суткам ее содержание в поровом растворе не превышает 0,25-0,35%, а $SO_{3неcвяз.}$ – 0,65%. При этом в поровом растворе в течение длительного времени сохраняется низкое соотношение $CaO_{своб.}/SO_3$.

В образцах с использованием золы Сызранской ТЭЦ при взаимодействии грунта со сланцевой золой активно образуются гидросиликаты, гидроалюминаты кальция различного состава. При взаимодействии алюмината кальция (C_3A) с гипсом и ангидритом в период 7-14 суток образуется этtringит (Рис. 2). Формирование этих соединений обеспечивает повышение прочности образцов к 28 суткам твердения. В дальнейшем (с 60 суток) отмечается активный рост кристаллов этtringита, что сопровождается проявлением кристаллизационного давления. В образцах повышается коэффициент линейного расширения до 3,89 и происходит разуплотнение образцов. К 90 суткам рост прочности замедляется, а в некоторых случаях эти процессы приводят к ее снижению. В условиях определенного дефицита извести в системе происходит преобразование фазового состава новообразований. Прекращается образование высокоосновных гидросиликатов кальция, замедляется их раскристаллизация. Высокоосновные гидросиликаты и гидроалюминаты трансформируются в низкоосновные соединения типа $CSH(A)$, $CSH(B)$. В системе образуются гелевидные, рентгеноаморфные соединения с меньшей прочностью. Этtringит преобразуется в моногидросульфалоюминат кальция.

Структурная перестройка сопровождается замедлением формирования новых соединений, а также небольшим ростом прочности.

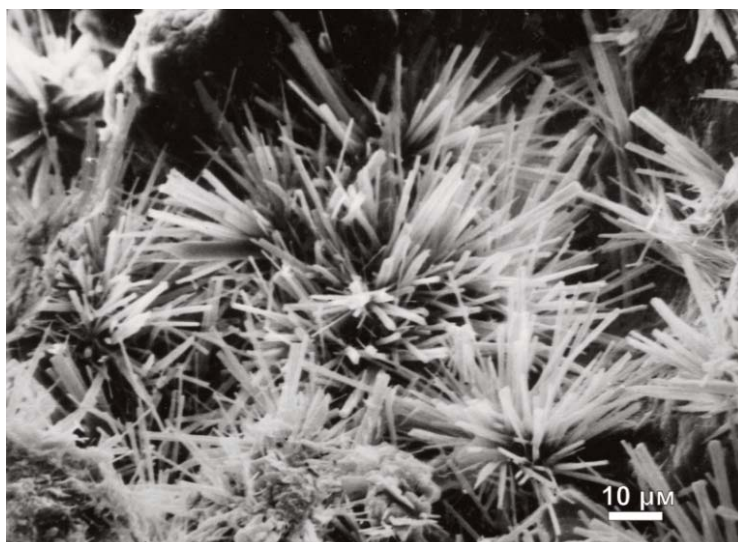


Рис. 2. Формирование этtringита на поверхности зольных частиц.
(Фото В.Н. Соколова).

Образцы тяжелого моренного суглинка на протяжении всех сроков испытаний отличались меньшими показателями прочности. Это обусловлено меньшим содержанием клинкерных минералов в составе золы. Высокая адсорбционная способность грунта к извести ($124,0$ мг-экв. $\text{CaO}/100$ г грунта) и расход ее на нейтрализацию гидrolитической кислотности способствуют снижению концентрации $\text{CaO}_{\text{своб.}}$ в поровом растворе и замедлению процесса твердения. Постепенное повышение прочности образцов связано с формированием в системе гидросиликатов кальция – $\text{C}_2\text{SH}(\text{C})$, $\text{C}_2\text{SH}(\text{B})$, $\text{C}_2\text{SH}(\text{D})$, $\text{C}_2\text{S}_2\text{H}$, $\text{CSH}(\text{A})$, $\text{CSH}(\text{B})$ и гидроалюминатов кальция C_2AH_8 , CAH_{10} , C_4AH_{10} . В связи с низким содержанием C_3A и SO_3 в составе золы в образцах активного образования этtringита не отмечалось. Не прослежено и снижения прочности образцов во времени.

Замедленный характер твердения зологрунтовых смесей и незначительный рост прочности образцов после 90 суток обусловлен снижением концентрации свободной извести. За 180 суток концентрация в поровом растворе $\text{CaO}_{\text{своб.}}$ снижается до $0,75\%$ и $\text{SO}_{3\text{несвяз.}}$ – до $0,30-0,35\%$. На механизм твердения зологрунтовой смеси оказывают влияние присутствующие в грунте органические вещества. Они увеличивают поглотительную способность грунта к извести, а с другой стороны, пленки органических веществ экранируют грунтовые частицы и ограничивают их взаимодействие с известью. При этом определенное влияние оказывает и переобогащенное состояние частиц извести, не полностью вступающей в процесс образования новых соединений.

Таким образом, исследованиями установлена возможность использования активных зол для укрепления грунтов в качестве самостоятельного вяжущего. При $30,0-40,0\%$ дозировке зол при стандартном уплотнении ($12,0$ МПа) получены образцы с высокой прочностью и водостойкостью. Эффективность применения зол для укрепления грунтов зависит от химико-минерального состава и гидравлической активности.

Сравнительный анализ кинетики твердения гидратированных зол и зологрунтовых смесей позволил определить общие и определенные отличительные особенности, обусловленные составом зол и грунтов. Отмечен замедленный характер твердения этих композиций, и, связанное с этим, изменение прочности образцов во времени. Ее показатели не зависят от содержания $\text{CaO}_{\text{своб.}}$ в составе зол. Интенсивность твердения гидратированных зол и зологрунтовых материалов, условия формирования и состав новообразований, а также характер их преобразования контролируются концентрацией $\text{CaO}_{\text{своб.}}$ и SO_3 в поровом растворе и их соотношением. Установлено, что высокоосновные и кристаллические новообразования преобладают в образцах гидратированных зол, а рентгеноаморфные соединения – в зологрунтовых смесях, особенно на поздних стадиях твердения.

Активное использование зол для укрепления грунтов в дорожном строительстве позволит решить экономические и экологические задачи, сократить расход вяжущих веществ и объемы накапливаемых промышленных отходов.

Литература

1. Галибина Е.А., Роль шлакового стекла в гидравлической активности сланцевых зол// Цементы и их свойства, Труды VI Международного конгресса по химии цемента, Том III. М. 1976, с. 115-119.
2. Евдокимова Л.А., Ларионова Н.А., Огородникова Е.Н. Химическая активизация зологрунта на основе торфяной золы//Использование зол ТЭС для закрепления грунтов. М. Изд-во Московского университета, 1984, с. 60-76.
3. Мелентьев В.А., Нагли Е.З. Гидрозолоудаление и золоотвалы. Л. Энергия. 1968.
4. Мырнин В.А., Евдокимова Л.А., Воронкевич С.Д. Физико-химические процессы твердения активной золы уноса// Biuletyn Geologiczny Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Том 24. Warszawa, 1981, pp. 25-47.
5. Мырнин В.А. Применение активной золы-уноса для укрепления глинистых грунтов// Biuletyn Geologiczny Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego. Том 24. Warszawa, 1981, pp. 123-140.
6. Путилин Е.И., Цветков В.С. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог. Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. М. Изд-во СоюздорНИИ, 2003.
7. Янин Е.П. Горючие сланцы и окружающая среда (экологические последствия добычи, переработки и использования). М. Изд-во ИМГРЭ, 2003.

МИГРАЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА В МЕРЗЛЫХ И ТАЛЫХ ГРУНТАХ ГОРОДСКОГО КУЛЬТУРНОГО СЛОЯ

В.Н. Макаров

Институт мерзлотоведения СО РАН, 677010, Россия, Якутск,
e-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru

Введение

Азот – самый широко распространенный в атмосфере и редкий в земной коре элемент. Это наиболее важный химический элемент для всего живого, начиная от вирусов и простейших микроорганизмов и кончая высокоорганизованными животными и человеком.

Цель данной работы – изучение геохимии азота и его соединений в сезонно-талых (СТ) и многолетнемерзлых (ММ) грунтах культурного слоя г. Якутска, установление закономерностей распределения элемента, изучение влияния городских антропогенных источников на поступление азота. В статье приводится новый материал по содержанию и характеру распределения различных минеральных форм азота в СТ и ММ грунтах, что дало возможность рассчитать объёмы поступления соединений азота в мерзлотные ландшафты, дать оценку природного и техногенного уровня его концентрации.

Результаты и обсуждение

Рассматриваются результаты изучения распределения минеральных соединений азота в СТ и ММ грунтах культурного слоя на территории г. Якутска. Якутск – один из старейших городов северо-востока России (основан в 1632 г.) и на его территории существуют районы, история развития которых насчитывает 350-380 лет. Такой длительный период антропогенного воздействия позволяет оценить временную динамику объёмов поступления и концентрации соединений азота в СТ и ММ грунты культурного слоя городской территории.

Концентрация минеральных соединений азота – аммонийных, нитратных и нитритных солей, изучалась в СТ и ММ грунтах, вскрытых буровыми скважинами на территории г. Якутска. Скважины глубиной 10-15 м бурились в селитебных и промышленных зонах города с периодом антропогенного воздействия: от 30 до 380 лет. Скважины располагались на ровной поверхности, на удалении от современных локальных источников загрязнения бытовыми отходами. Проходка скважин осуществлялась без промывки с полным отбором керна [1].

Химический состав керна скважин исследовался в лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН методами электрофореза (аналитики Л.Ю.Бойцова, Р.М.Петухова и О.В.Шепелева). Чувствительность анализа для соединений азота составляет: NH_4^+ – 0,003; NO_3^- – 0,0005; NO_2^- – 0,0002 мг- экв.

Территория города расположена на древней эрозионно-аккумулятивной равнине, охватывающей пойму, первую и вторую надпойменные террасы с абсолютными отметками от 85 до 105 м. На надпойменных террасах в районе Якутска развиты черноземно-луговые и лугово-черноземные почвы, на отдельных участках первой надпойменной террасы – дерново-луговые аллювиальные почвы. В большинстве своем почвы засолены.

Мощность многолетней мерзлоты в районе города 200-250 м, глубина сезонного протаивания изменяется от 1,5 до 3,5 м. Температура мерзлых пород зависит от возраста застройки города и на глубине 10 м составляет минус 2 – 8 °С. Многолетнемерзлые аллювиальные отложения надпойменных террас р. Лены, на которых расположен Якутск, сложены преимущественно мелко- и тонкозернистыми песками.

Городские почво-грунты вблизи поверхности (0,10-0,20 м) представлены преимущественно песками и супесями, очень пестрыми по химическому составу. В различных районах города могут преобладать хлоридные, сульфатные или карбонатные соли. По степени засоленности грунты изменяются от незасоленных – 0,021%, до сильно засоленных – 3,24 % преимущественно в старой части города.

Впервые характеристика культурного слоя (техногенных отложений) в криолитозоне была дана Н.И. Салтыковым в статье «О фундаментах зданий г. Якутска». Мощности этого слоя, состоящего

«...из перегноя, строительного мусора и отходов, накопившихся в течение трехсотлетнего существования города и перемешавшихся с естественным пылевато-суглинистым покровом, ... меняется в связи с возрастом отдельных участков города. Наибольшей величины (до 1,50-1,75 м) она достигает в районе ... заселенном уже в конце XVII в.» [2, стр. 102]. Интересно, что «... в «культурном» слое, обильном перегноем, надмерзлотные воды города содержат в значительном количестве примеси солей Cl , SO_4 и других, которые иногда остаются в жидком состоянии до температуры минус $3^{\circ} - 4^{\circ}$ » [2, стр. 103].

Наличие многолетнемерзлых пород определяет геодинамическую и геохимическую устойчивость толщи техногенных осадков, различающихся своим химическим и минеральным составом, строением, физико-механическими свойствами и особенностью миграции химических элементов.

Мощность современного культурного слоя изменяется от центра города к окраинам. Средняя мощность отложений в старых районах города - около 4 м, а в «молодых» - менее 2,5 м [1].

На протяжении 300 лет до середины 50-х годов XX века г. Якутск представлял собой, по существу, большую деревню, это «деревенский» этап развития города. В городе не осуществлялся централизованный постоянный вывоз всех отходов или смыв мелкого мусора, и поступление отходов намного превышало их вывоз с территории города.

Формирование культурного слоя, состоящего из перегноя, строительного мусора и отходов, определялось содержанием на его территории большого числа лошадей и коров, печным отоплением, отсутствием канализации, что отразилось на накоплении органики в грунтах. В мерзлотных условиях и в анаэробной среде при отсутствии кислорода органическое вещество в культурном слое очень хорошо сохраняется (выгребные ямы, навоз). Специфический гнилостный запах чувствуется при оттаивании мерзлых грунтов культурного слоя обычно на глубине 2-4 м, но иногда и нижележащих отложений до 6-8 м. Навоз является существенной составляющей культурного слоя Якутска; он накапливался на его территории со дня основания города на протяжении почти 300 лет. И только с середины XX в., при изменении хозяйственной жизни города (пуск городского канализационного коллектора, замена лошадей автомобилями, прекращение содержания и выпаса скота и др.), навоз перестает поступать в городские грунты. Одним из основных источников азота становятся атмосферные выпадения. В результате изменяется химический состав культурного слоя в городе, понижается концентрация соединений азота и мощность их аномалий в «молодых» грунтах (Рис. 1).



Рис. 1. Мощность аномальной зоны суммарного азота в грунтах с различной продолжительностью техногенеза.

Концентрация соединений азота в многолетнемерзлых кайнозойских аллювиальных отложениях, не затронутых антропогенным воздействием, в пересчете на азот, относительно равномерна и изменяется в пределах одного порядка – 0,0019-0,028 мг-экв., в среднем - 0,0129 мг-экв. (табл. 1).

<i>Таблица 1.</i>			
Концентрация соединений азота в многолетнемерзлых породах (глубина 4-15 м), мг-экв			
Распределение	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
Минимум	0,0025	0,0001	0,0001
Максим.	0,0360	0,0004	0,0090
Среднее	0,0157	0,0002	0,0027
Общ	0,0122	0,0001	0,0006

В многолетнемерзлых отложениях преобладают аммонийные формы азота, составляющие около 95% суммарного азота, при очень низком влиянии нитритных форм (0,1%). Соотношение различных форм азота в многолетнемерзлых отложениях можно представить следующим рядом (в скобках содержание данной формы, %):



Учитывая относительное постоянство концентрации соединений азота в многолетнемерзлых породах, можно проследить динамику изменения их концентрации в СТ грунтах, т.е. в зоне интенсивного антропогенного воздействия, на протяжении исторического периода развития города и в районах с различной длительностью и интенсивностью освоения.

Концентрация соединений азота в городских СТ грунтах колеблется в пределах трех (NH₄⁺, NO₂⁻) – четырех (NO₃⁻) порядков 0,0001-0,482 мг-экв. и составляет в среднем 0,234 мг-экв. В СТ грунтах, как и в аллювии, преобладают аммонийные формы азота, составляющие 3/4 суммарного азота, но резко преобладают нитраты. По уменьшению количества азота в грунтах различные его формы группируются в следующий ряд (%):



Абсолютное преобладание N-NH₄⁺ в ММ грунтах культурного слоя может быть связано с процессом замедления скорости нитрификации при отрицательных температурах.

Накопление азота в СТ грунтах культурного слоя селитебной зоны города Якутска происходило более-менее равномерно на протяжении всего «допромышленного» периода развития города и зависело, прежде всего, от продолжительности антропогенного воздействия. В пределах селитебной зоны города, где отсутствуют промышленные предприятия, суммарная концентрация азота колеблется от 0,0016 до 0,268 мг-экв., причем максимальные концентрации N_{общ} - 0,209-0,268 мг-экв. приурочены к старой части города, где продолжительность антропогенного воздействия составляет более 150-200 лет. Минимальные содержания N_{общ} - 0,0016-0,052 мг-экв. установлены в молодых районах города, с длительностью антропогенного воздействия менее 80 лет (табл. 2).

<i>Таблица 2.</i>				
Зависимость концентрации соединений азота в СТ грунтах КС селитебных зон Якутска от продолжительности техногенеза, мг-экв				
Продолжительность техногенеза, лет	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{общ}
300	0,2203	0,0283	0,3869	0,2680
150-200	0,1290	0,0006	0,4820	0,2090
100	0,0738	0,0012	0,0170	0,0620
80	0,0020	0,0001	0,0001	0,0016
60	0,0397	0,0034	0,0858	0,0520

Северная промышленная часть города, где сосредоточены объекты энергетики, аэропорт и другие, подвергается интенсивному техногенному воздействию в течение последних 50-60 лет. Концентрация азота в СТ грунтах этой части города составляет 0,399 мг-экв., в 40 раз выше, чем в многолетнемерзлых отложениях (табл. 3).

<i>Таблица 3.</i>				
Концентрация соединений азота в СТ грунтах промышленной зоны Якутска, мг-экв				
Продолжительность техногенза, лет	NH₄⁺	NO₂⁻	NO₃⁻	N_{общ}
50-60	0,3557	0,0431	0,4865	0,399

Скорость поступления соединений азота в СТ грунты города на протяжении периода слабого антропогенного воздействия, до середины XX века (около 300 лет), оставалась относительно постоянной, в среднем около 0,00089 мг-экв/год. Поэтому накопление азота в Якутске происходило более-менее равномерно на протяжении всего «деревенского» периода развития города и зависело, прежде всего, от продолжительности антропогенного воздействия.

В современных условиях, особенно в промышленной зоне города, ежегодное поступление соединений азота в СТ грунты, связанное в основном с атмосферными выбросами объектов энергетики, увеличилось более чем на порядок – до 0,01330 мг-экв/год (табл. 4), что привело к резкому увеличению концентрации азота в СТ грунтах.

<i>Таблица 4.</i>				
Интенсивность поступления соединений азота в СТ грунты КС Якутска в различные периоды антропогенного воздействия, мг-экв/год				
Продолжительность техногенза, лет	NH₄⁺	NO₂⁻	NO₃⁻	N_{общ}
Деревенский период				
300 -350	0,00070	0,000090	0,00129	0,00089
150-200	0,00043	0,000002	0,00160	0,00120
100	0,00025	0,000004	0,00006	0,00060
80	0,00003	0,000001	0,000001	0,00002
≥60	0,00013	0,000011	0,00020	0,00087
Среднее	0,00038	0,000020	0,00063	0,00089
Промышленный период				
30-40	0,0120	0,0014	0,0160	0,0133

Наибольшее увеличение скорости поступления соединений азота в СТ грунты промышленной зоны города по сравнению с селитебными районами, почти в 70 раз, принадлежит нитритам.

Интересно, что в северной промышленной части города – в зоне влияния выбросов электростанций наблюдается и максимальное содержание двуокиси азота в атмосфере Якутска - 6-21 ч/млрд (Рис. 2), в 30-100 раз выше фоновых концентраций [3].

Заключение

Установлена зависимость концентрации азота в СТ грунтах промышленных и селитебных зон городской территории от продолжительности техногенного воздействия.

Концентрация соединений азота в многолетнемерзлых кайнозойских аллювиальных отложениях в районе г. Якутска относительно равномерна и изменяется в пределах одного порядка – 0,002-0,013 мг-экв (в пересчете на N).

Скорость поступления соединений азота в СТ грунты культурного слоя в «деревенский» период, до середины XX века, на протяжении около 300 лет, оставалась относительно постоянной, в среднем

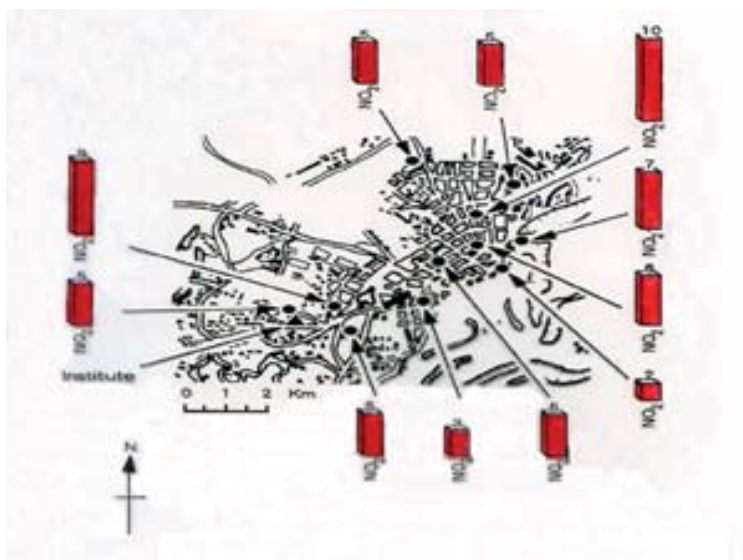


Рис. 2. Содержание двуокиси азота в атмосфере Якутска [3], ч/млрд.

– 0,00089 мг-экв/год. Накопление азота в СТ грунтах КС Якутска происходило более-менее равномерно на протяжении этого периода развития города и зависело, прежде всего, от продолжительности антропогенного воздействия.

В промышленной зоне города накопление соединений азота в СТ грунтах увеличилось более чем на порядок – до 0,01330 мг-экв/год, что привело к резкому возрастанию концентрации азота (в 2-5 раз) в СТ грунтах этой зоны по сравнению с селитебными районами.

Как в многолетнемерзлых породах, так и СТ грунтах селитебных и промышленных зон города преобладают аммонийные формы азота, составляющие 3/4 суммарного азота.

Литература

1. Макаров В.Н., Торговкин Н.В. Геохимия техногенных отложений (культурного слоя) в криолитозоне (на примере г. Якутска). – Криосфера Земли. – 2018 г. – № 3. – С.27-39.
2. Салтыков Н.И. О фундаментах зданий г. Якутска. / Н. И. Салтыков // Труды института мерзлотоведения им. В. А. Обручева, 1946. – Том 1. Жилищное и мелкопромышленное строительство в районах распространения вечной мерзлоты. – М., Л.: Изд-во АН СССР. – С. 102-136.
3. Ohta S., Murao M., Fukasawa T., Makarov V.N. Summer concentration of atmospheric pollutants in Urban and Rural areas of Siberia. - *Jorn. of Glob. Envir. Engin* v.1. Japan. 1995, pp. 15-25.

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ИЗЛИВОВ КИСЛЫХ ШАХТНЫХ ВОД КИЗЕЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

Н.Г. Максимович^{1,2}, В.Т. Хмурчик¹, О.Ю. Мещерякова^{1,2},
О.А. Березина^{1,2}, А.Д. Деменев¹

¹Естественнонаучный институт ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», 614068, г. Пермь, ул. Генкеля, 4

²ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: nmax54@gmail.com

О формировании кислых вод при шахтном способе разработки полезных ископаемых известно с 1556 г. В 1698 г. впервые зафиксировано образование кислых шахтных вод при добыче угля в Пенсильвании (США) [3]. Кислые воды образуются в результате природного процесса окисления сульфидных минералов при их контакте с атмосферным воздухом и водой. Добыча полезных ископаемых активизирует процесс, так как при этом улучшается контакт сульфидных минералов с водой и кислородом воздуха. Кислые шахтные воды могут образовываться как на разрабатываемых, так и неактивных, заброшенных и мелиорированных угольных месторождениях. Кислые шахтные воды характеризуются высокой минерализацией и повышенным содержанием сульфатов, железа, алюминия, и других металлов и металлоидов. При поступлении кислых вод в речную сеть происходит образование тонкого охристого осадка в результате роста рН, который переносится с речными водами на десятки километров и перекрывает донные отложения рек, изменяя их минеральный и химический состав.

Исследования состояния окружающей среды, проводимые авторами более 20 лет на территории закрытого в настоящее время Кизеловского угледобывающего бассейна, по-прежнему выявляют последствия изливов кислых вод (рН 2–4) с высоким содержанием железа, алюминия и микроэлементов [2]. Задачей представленной работы являлось исследование закономерностей миграции и накопления техногенного осадка, образовавшегося в результате смешения шахтных вод с речными.

Объектом исследования являлись донные отложения р. Косьвы, в воды которой ежегодно напрямую (без очистки) поступают наибольшие объемы кислых шахтных вод из заброшенных горных выработок и родников. Река Косьва, крупный левобережный приток р. Камы, берет начало на западном склоне Среднего Урала. Общая длина реки 310 км, уклон изменяется от 3% в верховьях до 1,8% в нижнем течении. Площадь водосборного бассейна 7485 км², средняя его высота 387 м, коэффициент густоты речной сети около 0,21 км/км². Годовая амплитуда колебания уровня воды составляет 248 см. Дождевые паводки наблюдаются в среднем 9 раз в году. Средний годовой расход воды 83,5 м³/с, максимальный (весеннее половодье) – 650 м³/с, минимальный (зимняя межень) 25,7 м³/с. Рельеф бассейна определяется наличием горных увалов, образующих Уральский хребет. Нижняя часть реки характеризуется широкой долиной, значительной извилистостью и неустойчивостью русла. По мере продвижения вверх по течению коренные берега сближаются, отчего долина участками приобретает характер каньона. В зоне ликвидированных шахт Кизеловского угольного бассейна ширина реки составляет 85 м, глубина 1,6 м, скорость течения 1,2 м/с. Район, по территории которого протекает р. Косьва, характеризуется развитыми карстовыми процессами – водосбор закарстован на 28–29%. Современный облик долины реки существенно изменился после строительства гидротехнических сооружений. В результате создания в 1946 г. Широковского водохранилища долина реки затоплена на протяжении 25 км выше г. Губахи, а заполнение в 1954 г. Камского водохранилища привело к затоплению устьевых участков. Для исследований был выбран участок реки ниже Широковского водохранилища общей протяженностью около 240 км, где р. Косьва пересекает Кизеловский угольный бассейн в широтном направлении. Выше Широковского водохранилища река практически не подвержена техногенному воздействию.

В бассейне р. Косьвы расположено 8 изливов кислых шахтных вод, которые попадают непосредственно в реку или ее притоки. Суммарный объем поступающих шахтных вод составляет до

15 млн. м³ в год; воды характеризуются кислой реакцией среды (рН 2,3–2,9) и сульфатным железисто-кальциевым составом с минерализацией до 13,3 г/л.

Проведенные исследования показали, что формирование осадка и его осаждение происходит сразу после смешения кислых шахтных вод с природными нейтральными речными водами. Осадок представляет собой взвесь, которая способна мигрировать вниз по течению рек на многие километры. Эта взвесь содержит значительное количество подвижных форм металлов и металлоидов. Перенос взвеси потоком приводит к тому, что дно реки покрывается слоем техногенных отложений, распределение которых неравномерно по длине реки: максимальная мощность техногенных отложений приходится на участки с минимальными скоростями течения – плесовые участки. В половодье и паводки происходит процесс смыва техногенных отложений за счёт резкого увеличения расходов воды, в меженные периоды наблюдается процесс аккумуляции техногенных отложений. Основными зонами аккумуляции являются приустьевые участки р. Косьвы и Косьвинский залив Камского водохранилища.

Определение масштабов образования техногенного осадка в р. Косьва проведено путем вычисления кислотопродуцирующего потенциала основных источников загрязнения реки с учетом их расхода. Кислотопродуцирующий потенциал отражает то количество CaCO₃, которое необходимо для полной нейтрализации кислой реакции среды загрязненных вод с определенным содержанием тяжелых металлов (Fe, Al, Mn) и определенным значением рН, и вычисляется по следующей формуле:

$$КП = 50[2Fe/56 + 3Al/27 + 2Mn/55 + 1000 \cdot 10^{-рН}], \quad (1)$$

где КП – кислотопродуцирующий потенциал, мг/дм³, Fe, Mn, Al – содержание соответствующих элементов, мг/дм³, рН – водородный показатель, ед. рН [4].

По данным химического состава и расхода вод, поступающих в р. Косьву из основных источников загрязнения, полученным в период 2007–2019 гг. [1], определены усредненные масштабы поступления техногенного осадка (табл. 1).

<i>Таблица 1.</i>				
Источники и масштабы поступления техногенного осадка в р. Косьве				
№ п/п	Объект	Дебит, м3/год	Масштабы поступления, т/год	Доля в общем объеме поступления, %
1	Скв.634 шахты Шумихинская	71800	100	0,54
2	Родник 417а (р. Шумиха)	1491320	560	3,01
3	Родник 407 (р. Ладейный Лог)	15263000	365	1,96
4	Штольня шахты им. 1 мая	500750	260	1,40
5	Штольня шахты им. Калинина	3820000	16600	89,32
6	Трубный ходок шахты им. Крупской	162800	700	3,77
Сумма		21309670	18585	100

Донные отложения реки по данным анализа водной вытяжки характеризовались преимущественно НСО₃–Са и SO₄–Са составом. Сухой остаток изменялся в широких пределах и в среднем составлял 1847 мг/кг, что превышало фоновые значения (520 мг/кг). Показатель рН водной и солевой вытяжки варьировал в пределах слабокислых и нейтральных значений с ярко выраженным снижением до 2,4–2,7 в районе устья изливов кислых вод. В микрокомпонентном составе отмечены повышенные концентрации преимущественно Zn, Be, Cu, V, W, Ni, Sr, Zr, Ba и др. элементов по сравнению с фоновым содержанием. Рост концентраций микроэлементов в основном зафиксирован в районе влияния подпора гидротехнического сооружения на р. Каме ниже изливов кислых вод, где, вероятно, и происходит интенсивное накопление тяжелых металлов в осадках. Повышенные концентрации Be, Cu, Li, Sr были зафиксированы ниже по течению в непосредственной близости от устья изливов, в то время как рост концентраций остальных элементов в основном фиксировался в районе начала влияния водохранилища, где река приобретала другой (переходный в водохранилище) гидрологический режим.

Для элементов, чьи концентрации превышали ПДК для поверхностных вод, был рассчитан коэффициент распределения (Concentration ratio, CR) в системе вода-донные осадки по формуле:

$$CR = X_s/X_w, \quad (2)$$

где X_s – концентрация элемента в осадке, X_w – концентрация элемента в воде.

Значение коэффициента CR в водотоках, принимающих кислые шахтные воды, варьирует в различных пределах: 4–50000 л/кг для кадмия, 50–20000 л/кг для свинца, 99–300000 л/кг для меди и т. д. [5]. Расчеты показали, что коэффициент распределения изменялся в пределах, сопоставимых с другими водотоками, где наблюдается формирование загрязнения тяжелыми металлами. Однако для р. Косьвы выявлена аномалия по цинку, значение коэффициента CR для которого в среднем составило 36621,2, что является очень высоким показателем для этого элемента.

В целом, полученные результаты позволили сделать вывод, что в донных отложениях р. Косьвы происходит накопление металлов и металлоидов, в результате чего формируется источник вторичного загрязнения. Это особенно выражено в районе начала подпора водами водохранилища. С большой долей вероятности этот участок и является одним из основных седиментационных барьеров на исследуемом водотоке для большинства элементов.

Литература

1. *Геоинформационная система Кизеловского угольного бассейна (ГИС КУБ). Электронный ресурс: www.kub.maps.psu.ru. (дата обращения 29.11.2021 г.).*
2. *Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. Пермь, Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2018. 288 с.*
3. *British Columbia Acid Mine Drainage Task Force (BCAMDTF). Draft acid rock drainage technical guide. Vancouver, SRK, 1989.*
4. *Kruse N.A., Stoertz M.W., Green D.H. et al. Acidity loading behavior in coal-mined watersheds // Mine Water and Environment. 2014. N 33, p. 177–186.*
5. *Pak G., Jung M., Kim H., K.J.B. K.J.B., Chung G., Kim S., Kim Y., Oa S., Yoon J. Assessment of metals loading in an acid mine drainage watershed // Mine Water and Environment. 2016. N 35. p. 44–54.*

О МОРФОЛОГИЧЕСКОМ СОСТАВЕ И СВОЙСТВАХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Ю.А. Мамаев

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Уланский пер., д.13.
E-mail: direct@geoenv.ru

Создание современной эффективной индустриальной отрасли обращения с отходами производства и потребления является важной государственной задачей на современном этапе развития Российской Федерации. Это объясняется тем, что в России быстрыми темпами идет наращивание объемов отходов, в том числе, твердых коммунальных отходов (ТКО), негативно воздействующих на окружающую среду, экологическую безопасность и здоровье населения [1].

К твердым коммунальным отходам относятся отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами, а также товары, утратившие свои потребительские свойства в процессе их использования физическими лицами в жилых помещениях в целях удовлетворения личных и бытовых нужд [2]. Значительные объемы накоплений ТКО в местах их размещения (захоронения) можно отнести к антропогенному типу отложений, а именно: одному из молодых геологических образований, связанных с жизнедеятельностью человека (Рис. 1).

С 2019 г. в России проводится реформа системы обращения с ТКО, целью которой является повышение эффективности управления обращением с отходами, и превращение данного вида хозяйствования в доходную отрасль экономики [3]. Важным вопросом стратегического планирования мероприятий по реализации реформы на региональном и муниципальном уровнях является повсеместное внедрение и совершенствование структурной схемы обращения с ТКО, которая включает разноплановые мероприятия направленные на осуществление на территориях субъектов РФ и муниципальных образований деятельности по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию и размещению ТКО, образующихся на данной территории или поступающих из других административно-территориальных образований. Мероприятия осуществляются в соответствии с приоритетностью решаемых задач. К ним относятся:

- максимальное использование потребительских качеств товаров, материалов и услуг, уменьшение количества образующихся отходов в местах их образования (сбора);
- обработка, сортировка, утилизация ТКО в целях получения из них вторичных ресурсов, возвращаемых в хозяйственный оборот;
- обезвреживание и захоронение не утилизируемых остатков с минимальным воздействием на окружающую среду и здоровье человека.

При разработке территориальных схем обращения с ТКО любого масштаба важно определение количества образующихся ТКО, их компонентного (морфологического) состава, а также физико-химических свойств отходов. В разных регионах эти показатели могут существенно отличаться, что обуславливается географическим положением и особенностями природных условий территорий, количеством населения, исторически сложившимся укладом его (населения) жизни, структурой потребления продуктов и товаров, торговыми и производственными связями с другими регионами и странами.

Необходимыми являются данные о ежегодном образовании отходов, систематизированные по категориям отходов согласно федеральному классификационному каталогу отходов (ФККО) и классам опасности от I до V. Обычно к ТКО относятся отходы IV и V классов опасности, но при этом в них могут содержаться более опасные компоненты и включения. Любые новые виды производств, технологий и продукции обуславливают постоянное расширение перечня отходов, вносимых в ФККО. Часто, на практике морфологическое разделение ТКО на большое количество компонентов оказывается излишним, и тогда ограничиваются укрупненным кратким перечнем отходов, содержащим 12–15 категорий: бумага, картон, текстиль, стекло, пластмасса, камни, кости, резина, кожа, древесина, металлический лом черный и цветной, органические отходы, уличный смет и другие [4]. Знание компонентного состава ТКО позволяет оценивать их как сырье для последующей переработки и использования содержащихся в них компонентов.

В соответствии с промежуточными итогами реализации реформы в сфере обращения с ТКО за 2021 г. [4] общий объем отходов в РФ составляет 65 млн. тонн в год. Из этого объема 30% приходится на пищевые отходы, 10% на отходы из пластмассы, 7% на стекло, 3% на металл. Прочие отходы, включающие: камни, древесину, кости, резину, кожу, бумагу и другие компоненты, составляют 28% общего объема. Около 60% объема ТКО подвергается обработке: дроблению, сортировке, обезвреживанию, уплотнению. Из них только 5-7% идет на переработку и повторное использование. Основная масса ТКО вывозится на объекты размещения ТКО: полигоны, свалки, отвалы, отстойники. Масса образования отходов на одного человека в год по территории РФ, в среднем, составляет 450 кг. При этом, нормативы накопления отходов по субъектам РФ варьируют в широких пределах, например: Амурская область – 671 кг/чел в год ; Камчатский край – 567 кг/чел в год; Еврейская АО – 153 кг/чел в год; Пермский край – 158 кг/ чел в год.

К показателям физических и физико-химических свойств ТКО относятся: плотность, влажность, теплоемкость, зольность, теплотехнические характеристики, агрохимические показатели и другие.



Рис. 1. Мусорная свалка – новый тип антропогенных отложений.

Плотность коммунальных отходов изменяется в широких пределах от 60 -120 до 350-530 кг/тона. Например, плотность ТКО из многоквартирных домов благоустроенного жилого фонда Московской области в весенне-летний сезон (в контейнерах) составляет от 0,18 до 0,22 т/м³, а в осенне-зимний – от 0,2 до 0,25 т/м³. Плотность ТКО г. Москвы колеблется от 0,11 до 0,42 т/м³. При этом, для разных городов среднегодовое значение плотности ТКО составляет 0,19-0,23 т/м³.

Влажность ТКО колеблется в широких пределах и зависит от сезонов года, соотношения содержащихся в них основных компонентов и условий кратковременного хранения на месте сбора.

Теплоемкость наиболее широко представленных компонентов ТКО колеблется в следующих пределах: стекло -1160 Дж/кг/К, бумага – 1260, текстиль - 1300, древесина - 1360, резина – 1590, пищевые отходы – 1715 и пластик -1300-2300 Дж/кг/К.

Теплоемкость рабочей массы ТКО, вывозимых из Москвы, составляет, в среднем, 8259,7 Дж/кг/К. ТКО обладают свойством слеживаться, т.е. при длительной неподвижности и без какого-либо внешнего воздействия, терять сыпучесть и уплотняться с выделением фильтрата и биогазов. Свойства ТКО существенно зависят не только от морфологического состава отходов, но и от методов и технологий их обработки, условий размещения, климатических воздействий и активности протекающих в них физико-химических и биологических процессов: разложения и деградации компонентов, гумификации, формирования фильтрата и биогазов, выщелачивания и миграции химических веществ и других.

Литература

1. *Осипов В.И. Управление твердыми коммунальными отходами как федеральный экологический проект // Геоэкология. – 2019. №3. – С. 3-12.*
2. *Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 г.» М.: Министерство природных ресурсов и экологии. 2018 г.*
3. *Постановление Правительства РФ от 22 сентября 2018 г. № 1130 “О разработке, общественном обсуждении, утверждении, корректировке территориальных схем в области обращения с отходами производства и потребления, в том числе с твердыми коммунальными отходами, а также о требованиях к составу и содержанию таких схем”*
4. *Промежуточные итоги реализации реформы в сфере ТКО. Отчет ППК « Российский Экологический Оператор», 2020 г.*

ИЗУЧЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ШЛАМОВ НАКОПИТЕЛЕЙ ПРИ ГИДРОГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Л.П. Парфенова, О.А. Екимова

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.
E-mail: okopenkina@yandex.ru

В гидрогеоэкологические задачи на всех стадиях проектирования и дальнейшей эксплуатации хвостохранилищ, включая их рекультивацию, входит оценка степени их негативного воздействия на подземные воды. Эффективное прогнозирование процессов загрязнения подземных вод во времени и в пространстве требует детального анализа гидродинамических и гидрохимических особенностей, характерных для изучаемых территорий и расположенных здесь источников загрязнения, определяющих поведение загрязняющих ингредиентов в водопроницающей среде, формирование качественного состава подземных вод, структуру фильтрационного и миграционного потоков выбор адекватной прогностической модели.

Источники загрязнения, к которым относятся и шламохранилища, по существующим классификациям отнесены к группе фиксированных, постоянно действующих. Для схематизации пространственной структуры фильтрационного потока, формирующегося под дном шламохранилища, необходимо оценить характер связи жидких стоков и подземных вод [1].

Анализ наблюдений за изменением положением уровня шламов в изучаемых накопителях [3] показал, что при практически неизменном режиме сброс-забор, примерно постоянной скорости заполнения хранилища, уровень шламов в них неуклонно растет. При этом, также постоянно растет объем дебалансовых вод, что в итоге приводит к заполнению чаши накопителя раньше проектируемого срока. Это означает, что заложенные в проекте фильтрационные потери оказываются завышенными по сравнению с фактическими. Потери на фильтрацию уменьшаются с увеличением срока эксплуатации накопителя [5].

Слой накопленных твердых шламов представляет собой особое образование, по своим фильтрационным и миграционным свойствам резко отличающееся от водоносных пород. Фильтрационные свойства слоя твердых шламов, в основном, определяют величину фильтрационных потерь, формирующихся под дном шламохранилища [2]. Образовавшийся из шлама экран снижает фильтрационные потери из шламохранилища.

Изучение фильтрационных свойств твердых шламов Малосернистого и Сорьинского шламохранилищ базировалось на комплексе лабораторных методов. На первой ступени значения коэффициентов фильтрации (K_f) были рассчитаны по результатам гранулометрического состава твердых шламов (рисунок). Далее фильтрационные свойства шламов оценивались по результатам серии опытов в приборе ПФ-1 и в «высоких колоннах». Методика их проведения не отличалась от стандартной и ее описание в работе не приводится.

Необходимо указать на то, что в качестве фильтруемых растворов использовались именно те жидкие стоки, которые складываются в чаши исследуемых шламохранилищ. Результаты расчетных и опытных определений фильтрационных свойств твердых шламов приведены в таблице. В соответствии с методическими указаниями по проектированию шламохранилищ обогатительных фабрик цветной металлургии расчет значений коэффициентов фильтрации твердых шламов, накапливаемых в придонной части сооружений, принимается по данным гранулометрического состава с учетом плотности их сложения и степени неоднородности. Проведенные исследования зернового состава шламов Малосернистого и Сорьинского шламохранилищ показали, что первые представлены супесями пылеватыми неоднородными, а вторые - суглинками пылеватыми весьма неоднородными [3]. Используя полученные наименования шламов по зерновому составу, выбираем соответствующие им значения K_f . Шламы Малосернистого шламохранилища – 10^{-3} - 10^{-6} м/сут, для шламов Сорьинского 10^{-5} - 10^{-7} м/сут. Следовательно, верно утверждение о том, что накопленные твердые шламы обладают крайне низкими фильтрационными свойствами, в основном зависящими от их зернового состава и высокой степени неоднородности.

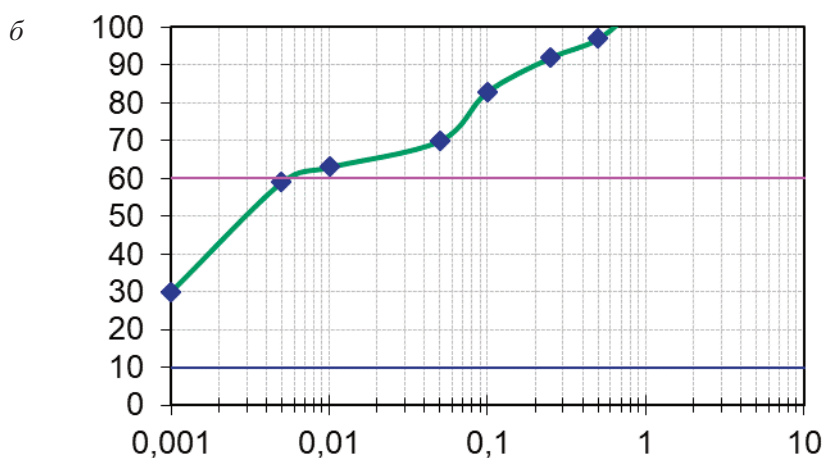
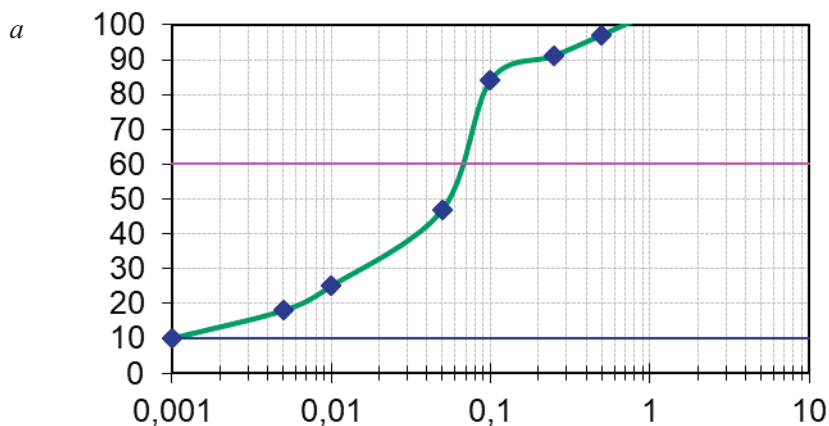


Рис. Графики неоднородности гранулометрического состава твердых шламов
а) Малосернистое шламохранилище б) Сорьинское шламохранилище.

Значения коэффициентов фильтрации твердых шламов					
Малосернистое шламохранилище			Сорьинское шламохранилище		
Расчетные по данным гранулометрического состава	Опытные (ПФ-1)	Опытные («высокие колонны»)	Расчетные по данным гранулометрического состава	Опытные (ПФ-1)	Опытные («высокие колонны»)
$7 \cdot 10^{-6}$ $7 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-4}$ $5 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$ $2,5 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-5}$ $2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$ $3 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$ $2 \cdot 10^{-5}$
*Примечание: вверху – максимальные значения коэффициентов фильтрации, внизу - минимальные					

Результаты, полученные как расчетными, так и опытными путями, ясно свидетельствуют о том, что фильтрационные свойства слоя твердых шламов, накопленных в течение 20-30 лет эксплуатации шламохранилища очень низкие. Согласно СНиП 2.02.02-85* твердые шламы отнесены категории слабо- и очень слабопроницаемых, по другой классификации отложения с $K_{\phi} < 0,1$ м/сут можно отнести к слабопроницаемым.

Таким образом, донные отложения, представленные слабопроницаемыми твердыми шламами, практически вне зависимости от их мощности создают на большой площади шламохранилища до-

полнительный фильтрационный экран, препятствующий образованию значительных фильтрационных потерь через дно.

Полученные результаты хорошо согласуются с натурными. Анализируя изменение уровня жидких шламов, приходим к выводу о том, что имеет место постоянный прирост уровня в темпах, превышающих проектные. В случае, если бы фильтрационные потери имели тенденцию к нарастанию характер изменения уровня был бы обратным. В целом на всех шламохранилищах Урала имеет место то обстоятельство что заполнение емкости происходит значительно раньше срока, рассчитанного (примерно вдвое) в проекте. Что может быть связано с завышенными значениями проектных фильтрационных потерь.

Литература

1. Гольдберг В.М., Газда С. *Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения*. М., Недра, 1984 – 262 с.
2. Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К. *Охрана подземных вод в горнодобывающих районах*. Л., Недра, 1980 – 320 с.
3. Парфенова Л.П. *Прогноз качества подземных вод в зонах влияния шламохранилищ медеплавильных комбинатов Среднего Урала: Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 1997 – 22 с.*
4. СП 23.13330.2018 «СНиП 2.02.02-85* Основания гидротехнических сооружений».
5. Тютюнова Ф.И., Пантелеева И.Я., Пантелеева Г.И., Огильви А.Н. *Прогноз качества подземных вод в связи с их охраной от загрязнения*. М., Недра, 1978 – 204 с.

ОПОЛЗНЕВЫЕ СМЕЩЕНИЯ КАК МЕХАНИЗМ МИГРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ ОСТРОВА ОЛЬХОН, ОЗЕРО БАЙКАЛ

В.А. Пеллинен, Т.Ю. Черкашина

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128.
E-mail: vadim.a.pellinen@ya.ru

Приольхонский район является одной из интенсивно осваиваемых территорий Байкальского региона и относится к федеральному государственному бюджетному учреждению «Прибайкальский заповедник» [10]. В настоящее время туристско-рекреационное развитие Приольхонья интенсивно и постоянно расширяется, особенно на острове Ольхон. Ольхон – крупнейший остров озера Байкал и часть Прибайкальского национального парка, который включен в список Всемирного природного наследия ЮНЕСКО [22]. Антропогенное воздействие на Приольхонье можно разделить на два следующих периода: сельскохозяйственный (1935–2005 гг.), имевший место в прошлом, и туристско-рекреационный, начавшийся в 2005 г. и продолжающийся по настоящее время [20]. Столь длительное воздействие антропогенной деятельности на почвенный покров Ольхона активизировало определенный тип экзогенных геологических процессов, проявившихся в формировании уникальных форм рельефа [2, 12,] и накоплению загрязняющих веществ в рекреационных зонах [5, 14, 15, 20].

Район исследования – водосборный бассейн Баян-Шунгенской губы, входящий в состав полигона «Приольхонье» для ежегодного мониторинга активности экзогенных геологических процессов. В пределах этого водосборного бассейна находится сельскохозяйственное поле, которое использовалось в период 1935–2005 гг. Прибрежная часть данной территории испытывает антропогенное воздействие в результате возникновения несанкционированных кемпинговых стоянок. Эта территория осложнена гравитационными процессами разного типа, такими как оползни, обвалы, делювиальный снос и др. В геологическом отношении берег сложен глинистыми и суглинистыми грунтами с включениями щебня и линзами песка. Деформированные склоны имеют четко очерченные желобовидные цирки с уступами высотой до 1–2 м.

Таким образом, исследование направлено на изучение влияния оползней на миграцию тяжелых металлов и общего органического углерода ($C_{\text{орг.общ.}}$), поступающего в почву в результате деятельности человека. Предложена методика геоэкологического мониторинга подобных территорий, основанная на оценке уровня загрязнения поверхностных отложений тяжелыми антропогенными металлами, такими как Hg, Cd, Pb, Cu. Мы подчеркиваем, что обнаружение миграционной взаимосвязи между оползнями и тяжелыми металлами, а также зависимости увеличения концентрации $C_{\text{орг.общ.}}$ от динамики оползней является новым взглядом этого исследования.

Конкретные цели исследования заключаются в следующем: (i) определение концентраций тяжелых металлов Hg, Cd, Pb и Cu, а также $C_{\text{орг.общ.}}$ в мелкозернистых фракциях (<100 мкм) почв с использованием рентгенофлуоресцентного анализа с волновой дисперсией (WDXRF), метода атомной абсорбции (ААС) и УФ-спектрофотометрии; (ii) оценка уровня загрязнения почв тяжелыми металлами, проведенная с использованием различных геохимических индексов, включая коэффициент загрязнения (C_p), степень загрязнения (C_d), нормализованный коэффициент обогащения (EF), индекс нагрузки загрязнения (PLI) и индекс геоаккумуляции (I_{geo}); (iii) оценка распределения антропогенных тяжелых металлов в полевых, оползневых и прибрежных зонах водосборного бассейна; (iv) наблюдение за миграцией тяжелых металлов и $C_{\text{орг.общ.}}$ из зоны поля в прибрежную; (v) изучение вклада оползневых процессов в миграцию и накопление этих загрязнителей и $C_{\text{орг.общ.}}$ в прибрежной зоне залива Баян-Шунген; и (vi) обоснование применения предложенной методологии для геоэкологического и геодинамического мониторинга.

Район исследования

В административном отношении остров Ольхон входит в состав Ольхонского района Иркутской области с центром в поселке Хужир; он находится на 53°14'36" северной широты и 107°28'31,3" восточной долготы. Исследуемая территория была разделена на три ландшафтные зоны: первая

зона (поле), включающая сельскохозяйственные поля и систему грунтовых дорог (участки S1 и S2); вторая зона (оползни), включающая основной уступ, уступы оползней и оползневой язык (участки S3 – S6); и третья зона (пляж), включающая пляж и береговую линию (участки S7 и S8). Всего было отобрано 80 образцов грунта из трех ландшафтных зон следующим образом: образцы для многоэлементного анализа отбирались в сентябре 2020 г., образцы для определения Сорг.общ. – в сентябре–ноябре 2014–2020 гг. во время ежегодного мониторинга оползневых процессов. С каждого участка (S1 – S8) было отобрано по 10 проб с использованием классического метода конверта [6] с шагом 25 м.

Методы

Известно, что тяжелые металлы накапливаются в поверхностном горизонте на глубине примерно 0–15 см, и этот показатель свидетельствует об экологическом дисбалансе в окружающей среде [14]. В соответствии с [7] все образцы грунтов отбирались с первых 15 см с помощью лопаты из углеродного пластика. Каждый образец был подготовлен как образец, состоящий из пяти проб. После этого они были запечатаны в полиэтиленовые пакеты и во время полевых работ содержались в естественных влажных условиях. Образцы были доставлены в ИЗК СО РАН для дальнейшего анализа.

В лаборатории отобранные образцы сушили на воздухе при комнатной температуре в течение 72 часов, а затем помещали в печь при 110°C до достижения постоянного веса. После этого образцы почвы тщательно измельчали, измельчали в агатовой ступке и просеивали через сито с размером ячейки 250 микрон перед проведением анализа. Контроль частиц размером 63 мкм был проведен на лазерном грананализаторе Analysette 22 NanoТес (FRITTSCH, Германия).

WDXRF анализ Cu и Pb. Все образцы почвы для WDXRF-анализа были приготовлены в соответствии с [20]. Все пробы прессовали в таблетки диаметром 30 мм с борной кислотой в качестве подложки на полуавтоматическом прессе HERZOG НТР-40 (MaschinenfabrikGmbH&Co.KG, Германия) с давлением 100 кН. Измерения интенсивностей Pb и Cu проводились с помощью WDXRF-спектрометра (S8 TIGER, Bruker AXS, Германия) [21].

Определение Hg и Cd методом ААС. Содержание Hg в твердом образце определяли прямым беспламенным методом с последующим определением атомной Hg на атомно-абсорбционном анализаторе (RA-915M) с приставкой RP-91C (Lumex®, Россия). Определение содержания Hg проводилось в соответствии с сертифицированным методом [20]. Для определения содержания Cd все образцы были подготовлены к анализу в соответствии с [3, 4, 8, 17]. Содержание Cd определяли методом ААС на спектрометре Solar М6 с системой коррекции фона (Thermo Electron, США) согласно методике [6].

В работе использовалось оборудование, закупленное в рамках гранта № 075-15-2021-682 и установленное в ЦКП «Геодинамика и Геохронологии» ИЗК СО РАН, а так же имеющиеся приборы ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования» ИГМ СО РАН.

Определение $C_{\text{орг.общ}}$. Метод определения содержания общего органического вещества ($C_{\text{орг.общ}}$) – классический вид анализа в почвоведении [1, 11]. Определение содержания $C_{\text{орг.общ}}$ в образцах почвы проводили методом УФ-спектрофотометрии по методу Тюрина в модификации ЦИНАО [5]. Метод Тюрина был усовершенствован в соответствии с существующими лабораторными условиями: (а) в течение 1 часа образцы постепенно нагревали на плите в колбах объемом 100 мл при температуре 94–98 °C при слабом кипении; (б) фотометрирование растворов проводили с использованием спектрофотометра GENESYS 10S (ThermoFisherScientific, Waltham, MA, USA); (в) правильность определения $C_{\text{орг.общ}}$ проверялась классическим методом титрования Walkley и Black в лабораториях ИЗК СО РАН и Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН.

Оценке уровня загрязнения почв тяжелыми металлами посвящены десятки работ [15, 18, 19, 20]. Для комплексной оценки уровня загрязнения грунтов тяжелыми металлами (Hg, Cd, Pb, Cu) и установления их возможных источников были рассчитаны пять геохимических индексов, такие как фактор загрязнения (C_p), степень загрязнения (C_d), нормализованный коэффициент обогащения (EF), индекс нагрузки загрязнения (PLI) и индекс геоаккумуляции (I_{geo}), подробнее о которых написано в работе Пеллинен и др. [20].

Многоэлементный анализ почв острова Ольхон методом РФА проводится с 2016 г. [14, 15, 16]. В работе [14] мы предложили метод WDXRF в качестве удобного и мощного метода определения

больших и малых содержания породообразующих (Na_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , K_2O , CaO , TiO_2 , MnO , Fe_2O_3 (общ.)) и следовых (F, Stot, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Pb, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, La, Ce, Nd) элементов в твердых образцах окружающей среды. Рассмотрены разные ландшафты, где развиты различные типы грунтов [7].

Результаты

В отличие от предыдущего исследования [20], в этой статье подробно рассмотрены результаты оценки распределения тяжелых металлов в мелкозернистой фракции (<100 мкм) грунтов, уровня их загрязнения, а также миграции этих тяжелых металлов и $C_{\text{орг.общ}}$ из зоны поля в прибрежную. Кроме того, установлены возможные источники поступления рассмотренных тяжелых металлов окружающую среду, а также возможная роль оползневых процессов в их миграции и накоплении в пределах исследуемой территории.

Для оценки уровня содержания тяжелых металлов в исследованных грунтах значения предельно допустимых концентраций (ПДК) для Hg и Pb были взяты из [9], а значения ПДК для Cd и Cu – из [13]. Региональные фоновые значения Hg, Cd, Pb и Cu взяты из работы В.И. Гребенщиковой и др. [5, 11].

Распределение исследуемых тяжелых металлов во всех обсуждаемых зонах указывает на тенденцию к небольшому увеличению содержания Hg от зоны поля (участки S1 и S2) к прибрежной (участки S7 и S8), тогда как содержание Cd значительно снижается по направлению к береговой зоне (участок S8). Отметим, что повышенные концентрации всех металлов сохранились во время миграции от участка S1 к участку S6 и изменились только в прибрежной зоне (участки S7 – S8). Такая стабильность в значениях концентраций Hg, Cd, Cu и Pb на пути «поле–оползень–берег» указывает на то, что эти металлы мигрировали из участков S1 в S6 без участия поверхностного стока, в котором обычно наблюдается потеря концентрации элементов. В этом случае, наблюдается потеря концентраций Cd, начиная с участка S7, и Pb, начиная с участка S8, вследствие волнения.

Опираясь на экспериментальные результаты, полученные в предыдущем исследовании [20], в данной работе была изучена только мелкозернистая фракция (<100 мкм) образцов грунта с использованием экологических и геохимических индексов (C_f , C_d , EF, PLI и I_{geo}).

Полученные средние значения C_f для всех тяжелых металлов представим в виде следующих рядов: для участков S1 и S2 – Hg (6,30)>Pb (1,58)>Cd (1,53)>Cu (0,86); для участков S3–S6 – Hg (5,83)>Cd (1,32)>Pb (1,42)>Cu (0,84); для участка S7 – Hg (6,29)>Pb (1,76)>Cd (0,32)>Cu (1,20); для участка S8 – Hg (6,71)>Pb (1,38)>Cd (0,30)>Cu (1,30). Максимальные значения C_f были установлены для Hg на всех участках, что указывает на загрязнение окружающей среды, даже если концентрация Hg была ниже ПДК. Повышенные значения C_f наблюдались для Cd (1,53 и 1,32) на участках S1–S6 и для Pb (1,58, 1,42 и 1,76) на участках S1–S7, а также для Cu (1,20 и 1,30) на участках S7 и S8, свидетельствующие об умеренном уровне загрязнения исследованной территории [20].

Оценка нагрузки загрязнения для отдельных участков всех исследуемых зон (индекс PLI), показала умеренный уровень загрязнения окружающей среды, согласно [21].

Средние значения EF для всех исследованных зон выглядят следующим образом: Hg (7,06)>Pb (1,74)>Cu (1,12)>Cd (1,03). Значения EF, полученные для Hg, Cd и Pb, варьируют в диапазоне 1,5–10,35, что указывает на возможный антропогенный источник этих тяжелых металлов в соответствии с [14].

Значения I_{geo} варьируют от 1,70 (участки S1 и S2) до 2,06 (участок S8) для Hg (среднее значение 1,85) и от –0,36 до 0,10 для Pb (среднее значение 0,18), а для Cu и Cd показаны отрицательные значения. Согласно [14], все зоны (участки S1–S8) можно считать умеренно загрязненными Hg, и только участок S7 (прибрежная зона, пляж) можно рассматривать как умеренно загрязненным Pb. Однако самое высокое значение I_{geo} для Hg составило 2,06, что может свидетельствовать о том, что на концентрацию этого металла в значительной степени повлияла антропогенная деятельность человека.

В данной работе проанализировано количество атмосферных осадков и концентрация $C_{\text{орг.общ}}$ в прибрежной зоне с 2014 по 2020 гг. В эти периоды промерзание прибрежной кромки заливов началось до образования ледяного покрова [2]. Отмечено, что увеличение концентрации $C_{\text{орг.общ}}$ соответствует годам с наибольшим количеством осадков, которые активировали оползневые процессы. В результате движения оползня его язык перемещается на пляж, а затем эти отложения размывается

под воздействием сильных волн (штормов) в осенне-зимний период. В результате этого мониторинга обнаружено, что значение $C_{\text{орг.общ}} \geq 0,5\%$ в прибрежной зоне указывает на то, что в наблюдаемом году происходило поступление оползневых масс в береговую зону. Таким образом, можно предположить, что $C_{\text{орг.общ}}$ является маркером произошедшего перемещения грунтовых масс в пляжную зону. Этот тип оползней называется солифлюкционным [12], то есть движение оползневых масс подобно движущейся ленте в аэропорту, которая перемещает материал из одного места в другое без изменения его химического состава. Об этом свидетельствуют постоянные значения концентраций Hg, Cd, Pb и Cu по пути миграции: поле – оползень – берег. Напомним, что концентрации Cd и Cu начинают уменьшаться только в прибрежной зоне из-за активности волновых течений.

Выводы

В ходе этого исследования изучены концентрации Hg, Cd, Pb, Cu и $C_{\text{орг.общ}}$ в мелкозернистой фракции (< 100 мкм) грунтов с использованием рентгенофлуоресцентного анализа с волновой дисперсией (WDXRF), метода атомной абсорбции (ААС) и УФ-спектрофотометрии. При помощи различных геохимических индексов изучен уровень антропогенного загрязнения грунтов тяжелыми металлами в зонах поля, оползня и пляжа. Определены возможные источники Hg, Cd, Pb и Cu в качестве антропогенных, включая туристические и рекреационные мероприятия, существующую дорожную систему, унаследованное загрязнение сельскохозяйственных полей фосфорными удобрениями и инсектицидами. Обсуждено возможное повышение уровня экологической опасности прибрежной экосистемы вследствие повышения концентрации исследуемых тяжелых металлов в почве.

Предложен следующий механизм миграции тяжелых металлов на пути поле – оползень – берег. Возможные антропогенные источники Hg, Cd и Pb возникли в зоне поля, тогда как источник Cu – в прибрежной зоне.

В результате мониторинга выявлено, что значение $C_{\text{орг.общ}} \geq 0,5\%$ в прибрежной зоне указывает на то, что в наблюдаемом году происходило поступление оползневых масс в береговую зону. Таким образом, можно предположить, что $C_{\text{орг.общ}}$ является маркером произошедшего перемещения грунтовых масс в пляжную зону. Предложена комплексная аналитическая и геохимическая схема геоэкологического и геодинамического мониторинга, которая является полезным инструментом для изучения территорий, осложнённых гравитационными процессами.

В ближайшие несколько лет предусмотрены дополнительные исследовательские работы по мониторингу изменения концентраций антропогенных тяжелых металлов, а также оценке уровней их загрязнения в почвах и отложениях аккумулятивных берегов острова Ольхон и озера Байкал. Остается актуальной проблема миграции и накопления антропогенных тяжелых металлов и $C_{\text{орг.общ}}$ в прибрежных экосистемах острова Ольхон и озера Байкал. Установление миграционных взаимосвязей между оползнями и тяжелыми металлами, а также зависимости увеличения концентрации $C_{\text{орг.общ}}$ от динамики оползней является новым взглядом этого исследования и требует пристального и постоянного внимания.

Экспедиционные работы были выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-77-00042.

Литература

1. Аринушкина, Е.Б. Руководство по химическому анализу почв; Изд-во МГУ: Москва, Россия, 1970; С. 130–139.
2. Батуев А.Р., Корытный Л.М., Оюунгэрэл Ж., Энхтайван Д. Экологический атлас бассейна Байкала; Институт географии СО РАН: Иркутск, Россия, 2015;
3. ГОСТ 29269-91. Почвы. Общие требования к выполнению анализов; Союзхозхимия: Москва, Россия, 1993; Доступно на сайте: <https://docs.cntd.ru> дата обращения 2 марта 2021 г.).
4. ГОСТ 701-89. Концентрированная азотная кислота. Характеристики; Издательство стандартов: Москва, Россия, 1989; Доступно на сайте: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 21 сентября 2021 г.).
5. Гребенищикова В.И., Лустенберг Э.Е., Китаев Н.А., Ломоносов И.С. Геохимия окружающей среды Байкальского региона (Байкальский геоэкологический полигон); Академическое издательство «ГЕО»: Новосибирск, Россия, 2008

6. Гуляева Н.Г. Методические рекомендации по эколого-геохимической оценке территорий при проведении многоцелевого геохимического картирования масштабов 1: 1 000 000 и 1: 200 000; IMGRE: Москва, Россия, 2002
7. Кузьмин В.А. Геохимия почв юга Восточной Сибири; Институт географии СО РАН: Иркутск, Россия, 2005
8. Методика измерения массовой доли образцов почвы, грунта и донных отложений с помощью атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии М-МВИ-80-2008 (F.R. 1.31.2004.01278), Санкт-Петербург Пресс: Санкт-Петербург, Россия, 2008.
9. Онищенко Г.Г. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: гигиенические нормы 2.1.7.2042-06. Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва. 2006. Доступно в Интернете: <https://files.stroyinf.ru> (доступ 17 июня 2021 г.).
10. Приказ Минприроды № 251 от 18 июля 2013 года. О реорганизации государственных учреждений, подчиненных Министерству природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Доступно на сайте: <http://www.consultant.ru> (по состоянию на 11 июня 2021 г.).
11. Самофалова И.А., Лобанова Е.А. Почвоведение: Лабораторный практикум; Издательско-полиграфический центр: Пермь, Россия, 2021 г.
12. Трещинский Ю.Б. Техногенные изменения геологической среды (на примере Сибирского региона); Институт земной коры СО РАН: Иркутск, Россия, 2007.
13. CCME, Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. 2017. Available online: <http://esdat.net> (accessed on 27 June 2021).
14. Cherkashina, T.Y. Pellinen, V.A. Applicability of X-ray fluorescence spectrometry for assessing geochemical features and heavy metal contamination of soils: Primary data. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 2020, p. 1–16.
15. Cherkashina, T.Y. Pellinen, V.A. Assessment of soil pollution level using environmental indices in Olkhon Island, Lake Baikal, Russia: Primary data. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 2020, p. 1–12.
16. Cherkashina, T.Y. Shtel'makh, S.I. Pashkova, G.V. Determination of trace elements in calcium rich carbonate rocks by Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry for environmental and geochemical studies. *Appl. Radiat. Isot.* 2017, 130, p. 153–161.
17. Church, S.E. Multi-element analysis of fifty-four geochemical reference samples using inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry. *Geostand. Geoanal. Res.* 1981, 5, p. 133–160.
18. Coskun, M. Steinnes, E. Frontasyeva, M.V. Sjobakk, T.E. Demkina, S. Heavy metal pollution of surface soil in the Thrace region, Turkey. *Environ. Monit. Assess.* 2006, 119, p. 545–556.
19. Gholizadeh M., Patimar R. Ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from the Gorgan Bay, Caspian Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 2018, 137, 662–667.
20. Pellinen V.A., Cherkashina T.Y. Gustaytis M.A. Assessment of metal pollution and subsequent ecological risk in the coastal zone of Olkhon Island, Lake Baikal, Russia. *Sci. Tot. Environ.* 2021, 786, 147441.
21. Service Manual, S8 TIGER XRF Spectrometer; Bruker AXS GmbH: Karlsruhe, Germany, 2007.
22. World Heritage List of UNESCO. Available online: <http://whc.unesco.org> (accessed on 10 September 2020).

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕК БЕРЕЗНИКОВСКОГО ГОРОДСКОГО ОКРУГА

А.Д. Перовщикова

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: a.rina.perevoshchikova@yandex.ru

Введение

Изучение элементного состава донных отложений – одно из важных направлений в геохимии, которое позволяет получить информацию о содержании широкого перечня загрязняющих веществ, оценить их влияние на качество поверхностных вод, основываясь на определении фоновых значений содержания элементов в отложениях и изменениях их поступлений в течение длительного времени [1].

Донные отложения рек активно аккумулируют тяжелые металлы. В результате они могут быть как первичным, так и вторичным источником загрязнения всей водной экосистемы. Это связано с процессами перераспределения загрязняющих веществ в донных отложениях, обменными процессами в системе «донные отложения – вода».

Несмотря на повышенный интерес к микроэлементному составу донных отложений в рамках их экологического состояния при научных исследованиях, в настоящее время недостаточно разработана система нормирования их состояния градостроительными, природоохранными и санитарными нормами, что не позволяет дать обоснованную характеристику уровня их загрязнения. Это связано с тем, что для донных отложений отсутствуют предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ. В связи с этим важной задачей в области экологического нормирования является поиск подходов к установлению стандартов качества донных отложений как фактора риска для водной экосистемы.

Малые реки выполняют важную экологическую роль за счет формирования гидрологического и гидрохимического режима более крупных рек. В связи с этим, на территориях с высокой антропогенной нагрузки важной и актуальной задачей является изучение экологического состояния и микроэлементного состава донных отложений малых рек [13].

Актуальность проблемы изучения микроэлементного состава донных отложений, избранной для исследования, обусловлена нарастающей экологизацией производственной и хозяйственной деятельности.

Территория и методы исследований

Город Березники находится в 160 км к северу от г. Перми и является крупнейшим промышленным центром. В его пределах расположены предприятия по добыче калийно-магниевых солей, месторождения нефти и газа и строительных материалов.

На территории исследования в водные объекты ежегодно сбрасывается более 50 млн м³ загрязненных сточных вод, содержащих хлориды, сульфаты, нефтепродукты, кобальт, цинк, ванадий, барий и т.д. Сточные воды промышленных предприятий г. Березники после предварительной очистки направляются в Промышленный канал (ПК), далее в ковш-отстойник ПК, перекачиваются и поступают через рассеивающий выпуск в р. Каму (Камское водохранилище). Ранее проведенные исследования показывают, что в донных отложениях ПК были обнаружены такие металлы, как V, Cu, Zn, Cd, As, Ni, Hg, Pb, Cr, Sb и др. [2].

Спецификой калийного производства является накопление галитовых отходов и глинисто-солевых шламов, которые размещаются в солеотвалах шламохранилищах. Указанные отходы характеризуются высоким содержанием хлоридов, сульфатов, Na, K, Ba, Fe, Cd, Co, Mn, Cu, Ni, Rb, Sr, Cr, Zn, Br [16]. Стоки с солеотвалов характеризуются хлоридно-натрий-калиевым-сульфатным составом. Высокие концентрации среди макроэлементов отмечаются для Ca, Mg, среди микроэлементов – Sr, Mn, Pb, Ba, Cr, Zn, Li, V и ряд других [14].

Согласно опубликованным данным [7], воды из Нижне-Зырянского водохранилища, впадающих в него рек и ручьев, р. Зырянки в повышенном количестве (в сравнении с ПДК) содержат нефтепродукты и тяжелые металлы, такие как Zn, Co и Ni.

Воздействию калийной промышленности подвержены подземные воды четвертичных и шешминских отложений. Под влиянием калийных предприятий в долине р. Ленвы сформировалась зона засоления подземных вод. Прежде пресные подземные воды $\text{HCO}_3\text{-Ca}^{2+}$ или $\text{SO}_4\text{-Ca}$ состава, характерные для четвертичных и шешминских отложений, имеют в настоящее время Cl-Na состав. Они разгружаются в долине реки в виде площадной разгрузки, родников или субаквально. Большое количество атмосферных осадков, холодный климат и расчлененность рельефа способствуют активной водной миграции водорастворимых солей, накопленных в шламохранилище [15].

Ведущим показателем формирования эколого-геохимических ситуаций в донных отложениях является их гранулометрический состав, который становится основополагающим критерием отдельных методик эколого-геохимических оценок [11]. В суглинистых и глинистых илах за счет осаждения на сорбционном барьере содержание тяжелых металлов, как правило, в несколько раз выше, чем в песчаных, супесчаных и алевритовых илах.

Согласно проведенному автором обзору на сегодняшний день известно более 25 зарубежных и российских методов оценки загрязнения донных отложений [3, 4, 5, 6, 8, 12, 18, 19]. При этом не все методы считаются эффективными в решении прикладной задачи их экологического состояния. Так, использование кларковых значений и методов для оценки состояния почв не позволяют дать достоверную оценку эколого-геохимического состояния водного объекта.

В России в настоящее время не существуют единых стандартов в отношении качества донных отложений. Преимуществом количественного метода индекса геоаккумуляции (по Мюллеру), который вычисляется по формуле с учетом концентрации тяжелых металлов в донных отложениях и их фоновых значений, является возможность качественной оценки уровня загрязнения донных отложений исследуемого водного объекта.

Таким образом, в качестве метода оценки загрязнения донных отложений Березниковского городского округа в данной работе автором использован количественный метод с использованием индекса геоаккумуляции I_{geo} по Мюллеру.

$$I_{\text{geo}} = \log_2(\text{Cn}/1,5\text{Bn}),$$

где I_{geo} – индекс геоаккумуляции; Cn – концентрация рассматриваемого элемента в донных отложениях; Bn – геохимический фон рассматриваемого элемента; 1,5 – коэффициент, выражающий естественную вариативность содержания рассматриваемого элемента в окружающей среде.

Пробы донных отложений были отобраны в летний период 2019 г. Лабораторные исследования проводились на базе сектора наноминералогии «Центра коллективного пользования Пермского государственного национального исследовательского университета». Содержание элементов в пробах определяли масс-спектральным методом на приборе BRUKER AURORAM 90ICP-MS.

Всего было отобрано 13 проб, 9 из которых – алевритовые и 4 – мелкозернистые песчаные. Количество точек опробования и их местоположение представлены на Рис. 1.

Важным моментом при расчете индекса геоаккумуляции является выбор фона для его расчета. В качестве условного фона в рамках настоящей работы были приняты данные по пункту опробования на удалении от промышленных объектов города, где отмечены наименьшими значениями концентраций большинства исследуемых микроэлементов – пункт 3 на р. Бушкашер (табл.1).

Результаты и их обсуждение

Расчеты индекса геоаккумуляции позволяют определить классы загрязнения донных отложений Березниковского городского округа (табл. 2), выявить их эколого-геохимическую специфику. Расчеты были выполнены с помощью программы Microsoft Excel. С учетом значения индекса геоаккумуляции донные отложения в исследуемых водоемах характеризуются степенью загрязнения в диапазоне от «умеренного» до «чрезмерного». Для донных отложений водотоков наиболее высокие значения этого индекса отмечены для Ag (до 7,18), Hg (до 4,37), Cd (до 4,27), Co (до 4,10) и Cu (до 3,38).

Наибольшее значение индекса геоаккумуляции в верховье реки Волим (точка отбора №13) отмечено для Cd (до 3,37), которое соответствует сильно загрязненному уровню.

Наиболее загрязненными оказались пробы, отобранные в среднем течении р. Бушкашер (проба №2), канал, р.Зырянка (проба №4), озеро без названия (проба №7), ручей без названия (проба №8), ручей Балахонский Лог (проба №11), р. Лёнва (проба №12) и р.Волим (проба №13).



Рис. 1. Обзорная схема территории исследования с пунктами отбора проб.

Загрязнение донных отложений в этих пунктах соответствует категориям от «сильно загрязненной» до «чрезвычайно загрязненной». Здесь отмечается накопление таких элементов, как Co, Cd, Ag, Hg. Все эти элементы характеризуются высокой степенью экологической опасности. Согласно справочной информации [9, 17] Hg относится к элементу 1-го класса опасности (чрезвычайно опасное вещество), Ag, Co, Cd – ко 2-му классу опасности (высокоопасное вещество). На Рис. 2 представлена схема с пунктами отбора, в которых зафиксирован наибольший уровень загрязнения.

Относительно незагрязненными, согласно индексу геоаккумуляции, можно считать пробы донных отложений, отобранные в верховье р. Бушкашер (проба №1), р. Зырянка (проба №5), ручей без названия – м/р им. Сухарева (проба №6), ручей без названия – дорога на Легино (проба №9), ручей Котельный Лог (проба №10). Данное обстоятельство может аргументироваться следующим: для пунктов отбора №1, №6 и №10 – отсутствием источников существенного воздействия; пунктов №5 и №9 – большой водностью объектов отбора и активным процессам разбавления поступающего загрязнения.

Для выявления геохимических ассоциаций исследованных элементов был проведен корреляционный анализ.

Индексы отношений, опирающиеся на результаты корреляционного анализа [10], позволят выявить типоморфные особенности и закономерности в строении геохимических полей. На основе выполненного корреляционного анализа, для элементов, индекс геоаккумуляции которых указывает на сильное и чрезмерное загрязнение, выявлены геохимические ассоциации (табл. 3).

Ввиду того, что для Ag и Co выделяется большое количество элементов в геохимических ассоциациях, можно сделать вывод, что данные ассоциации являются ассоциациями сонахождения. Элементы, входящие в данные ряды, связаны пространственным размещением на одной территории, но поступают на нее из разных источников, в том числе и естественных. Поступление значительной части данных элементов в донные отложения водоемов исследуемой территории с учетом значительной промышленной нагрузки связано с их техногенной миграцией.

Исходя из источников поступления загрязняющих веществ в депонирующую среду донных отложений, геохимическую ассоциацию, состоящую из пары элементов Cd–Cu, можно отнести к парагенетической. Образующие данные ассоциации элементы имеют общие пути поступления. Так же наблюдается зональность образуемых Cu и Cd геохимических аномалий. Повышенные значения индексов геоаккумуляции для рассмотренных элементов наблюдаются в направлении от севера-запада к югу исследуемой территории, в донных отложениях Озера без названия (точка отбора №7), рек Ленва и Волим (точки отбора №12 и 13, соответственно).

Таблица 1.

Содержание микроэлементов в донных отложениях Березниковского городского округа, мг/кг

Номер точки опробования	Микроэлементы																					
	Li	Be	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Rb	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Cs	W	Hg	Pb	Sr
1	30,15	1,48	51,02	13,90	34,33	22,20	54,50	10,91	12,74	1,00	9,08	0,56	0,07	1,26	1,48	0,84	0,03	1,79	1,05	0,22	13,07	42,19
2	26,59	1,37	44,00	24,76	39,95	25,60	57,43	9,36	15,31	1,14	4,51	0,71	0,12	1,99	1,23	0,83	0,05	0,91	0,83	0,28	16,40	87,25
3 (условный фон)	5,81	0,36	17,85	1,61	38,10	25,30	49,60	3,32	8,20	1,05	9,64	0,15	0,04	1,96	0,63	0,29	0,07	0,49	0,29	0,06	15,60	549,47
4	1,06	0,09	84,75	31,52	34,21	32,99	55,53	1,96	1,62	0,52	1,29	0,98	0,12	0,07	0,11	0,18	0,59	0,05	0,37	0,93	18,13	74,10
5	7,63	0,27	25,32	2,89	6,36	34,47	12,11	2,63	0,83	1,18	12,73	0,18	0,35	1,90	0,24	0,25	0,34	0,45	0,19	0,11	9,78	55,35
6	6,56	0,25	27,03	2,35	5,80	33,84	9,99	2,05	2,08	0,65	11,16	0,11	0,29	1,71	0,18	0,16	0,25	0,33	0,15	0,12	3,35	43,86
7	21,81	1,12	66,37	31,57	45,17	221,02	53,66	10,65	4,13	0,72	21,47	0,57	1,05	4,92	0,91	0,43	0,54	0,85	0,55	0,22	8,96	82,32
8	19,43	1,12	77,65	41,44	37,30	21,60	41,00	10,34	8,10	1,23	21,42	0,68	9,27	0,78	1,16	0,57	0,86	1,83	1,01	0,03	19,00	936,25
9	7,00	0,26	22,93	3,13	6,73	38,46	10,76	2,07	2,49	1,42	10,23	0,20	0,26	1,50	0,14	0,20	0,18	0,28	0,09	0,07	3,64	36,54
10	23,32	1,16	81,37	15,47	36,70	20,40	72,90	10,27	5,10	0,90	37,19	0,50	7,61	0,05	1,17	1,02	1,01	1,94	0,92	0,04	12,30	777,09
11	13,87	0,72	52,59	9,81	18,90	14,20	44,50	7,29	4,00	0,36	26,67	0,22	4,92	0,17	0,69	0,30	0,42	1,25	0,50	0,03	7,30	946,88
12	13,10	0,58	48,21	10,45	16,02	43,82	21,91	4,16	3,70	0,40	10,23	0,25	1,27	3,23	0,38	0,32	0,38	0,66	0,31	0,43	6,55	68,85
13	9,56	0,38	41,90	5,71	10,68	39,06	18,69	3,12	2,92	1,36	12,26	0,12	0,74	2,63	0,23	0,21	0,30	0,41	0,14	0,14	4,80	65,17

Таблица 2.

Значения индекса геоаккумуляции микроэлементов в донных отложениях Березниковского городского округа

Место отбора пробы по схеме	Значения индекса геоаккумуляции																					
	Li	Be	Cr	Co	Ga	Se	Rb	Sr	Mo	Ag	Sn	Sb	Te	Cs	W	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
1	1,79	1,46	0,93	2,53	1,13	-0,65	-0,67	-4,29	1,30	0,18	0,64	0,95	-1,71	1,29	1,27	-0,74	-0,77	-0,45	0,05	-1,22	1,27	-0,84
2	1,61	1,36	0,72	3,36	0,91	-0,46	-1,68	-3,24	1,64	0,91	0,38	0,94	-1,25	0,31	0,93	-0,52	-0,57	-0,37	0,32	-0,56	1,66	-0,51
4	-4,30	-3,51	0,10	1,10	-2,48	-0,04	-4,96	-4,26	1,54	-5,93	-3,29	-1,34	-0,11	-5,15	-1,02	0,27	0,63	-0,27	-1,89	-1,87	4,37	0,73
5	-1,45	-1,98	-1,64	-2,35	-2,06	1,15	-1,65	-4,68	-0,89	-4,41	-2,11	-0,86	-0,89	-2,05	-2,00	-2,16	0,69	-2,46	-2,85	2,90	1,29	-0,16
6	-1,66	-2,12	-1,54	-2,65	-2,42	0,29	-1,84	-5,02	-1,62	-4,66	-2,49	-1,45	-1,35	-2,50	-2,33	-2,29	0,67	-2,74	-1,53	2,75	1,41	-1,71
7	0,07	0,05	-0,25	1,10	-0,04	0,43	-0,90	-4,11	0,76	-2,81	-0,19	-0,06	-0,22	-1,14	-0,45	0,67	3,38	-0,31	-0,54	4,27	2,30	-0,29
8	1,16	1,06	1,54	4,10	1,05	-0,35	0,57	0,18	1,57	7,18	0,29	0,40	2,95	1,32	1,22	-0,62	-0,81	-0,86	-0,60	-1,91	-1,58	-0,30
9	-1,57	-2,05	-1,78	-2,23	-2,40	1,41	-1,97	-5,28	-0,74	-4,84	-2,93	-1,19	-1,80	-2,76	-3,11	-2,07	0,85	-2,63	-1,27	2,56	0,67	-1,59
10	0,16	0,10	0,04	0,07	-0,09	0,76	-0,11	-0,87	0,56	0,04	0,18	1,19	0,68	0,05	0,29	0,37	-0,06	0,13	-0,23	-2,35	-0,17	0,17
11	0,67	0,42	0,97	2,02	0,55	-2,14	0,88	0,20	-0,03	6,27	-0,46	-0,54	1,92	0,76	0,20	-1,60	-1,42	-0,74	-1,62	-4,11	-1,58	-1,68
12	-0,67	-0,91	-0,71	-0,49	-1,39	-0,41	-1,97	-4,37	-0,40	-2,54	-1,42	-0,47	-0,71	-1,51	-1,28	-0,82	1,04	-1,61	-0,70	3,66	3,27	-0,74
13	-1,12	-1,50	-0,91	-1,37	-1,81	1,35	-1,71	-4,45	-1,49	-3,32	-2,16	-1,09	-1,09	-2,20	-2,44	-1,41	0,87	-1,84	-1,04	3,37	1,61	-1,19

Таблица 3.

Геохимические ассоциации для элементов с наиболее высокими значениями индекса геоаккумуляции		
Элемент	Значение I_{geo}	Геохимический ряд с учетом величины значимых коэффициентов корреляции
Ag	До 7,18	Sr–Cs–Ga–Cr–Rb–Be–Te–W–Co–Li–Sn
Hg	До 4,37	Нет значимых связей
Cd	До 4,23	Cu
Co	До 4,1	Cr–W–Mo–Ga–Sr–Zn–Ag–Sn–Be
Cu	До 3,38	Cd

Тот факт, что для Hg не выявлено значимых связей с другими элементами, может указывать на то, что данный элемент имеет техногенный источник. Для точки отбора проб №4 – это многочисленные предприятия г. Березники, которые осуществляют разрешенный сброс сточных вод в обследованный промышленный канал. Для точки 12 – садоводческие товарищества, в том числе за счет использования состав средств по борьбе с насекомыми-вредителями.



Рис. 2. Пункты отбора проб с высокими значениями индекса геоаккумуляции элементов.

Заключение

Донные отложения выступают депонирующей средой, в которой происходит накопление широкого перечня химических элементов и соединений. Наиболее ярко эти процессы проявляются в донных отложениях водотоков урбанизированных территорий.

Город Березники является крупным индустриальным центром Уральского экономического района с предприятиями химической промышленности и цветной металлургии. По Пермскому краю город занимает лидирующие позиции по суммарному уровню антропогенной нагрузки. Образование и размещение отходов в природной среде, сбрасываемые загрязняющие вещества в водные объекты, выбросы загрязняющих веществ от автотранспорта на протяжении десятилетий наносили огромный экологический ущерб окружающей среде и создали серьезные экологические проблемы непосредственно в городе Березники и его округе.

С учетом расположения исследованных водных объектов в пределах городской и промышленной зон, химический состав донных отложений формируется за счет природно-техногенной седиментации. Техногенными источниками поступления в них микроэлементов могут быть сточные воды промышленных предприятий и недостаточно очищенные канализационные воды, воздействие добычи нефти, поверхностный сток с территории города, влияние садоводческих товариществ.

На основе значений индекса геоаккумуляции установлено, что донные отложения исследованных водных объектов Березниковского городского округа наиболее загрязнены Ag, Co, Cd и Hg. Такие объекты исследования, как р. Бушкашер, Промышленный канал, ручей без названия (месторождение им. Сухарева), ручей без названия (правый приток Верхне-Зырянского вдхр.), ручей Балахонский Лог, р. Ленва, р. Волим наиболее сильно подвержены загрязнению. Содержания Rb, Sr, Sn, Ni, Zn, As и Pb имеют несущественные превышения относительно фона и характеризуются более низкими значениями индекса геоаккумуляции.

Промышленное производство обуславливает накопление в донных отложениях техногенных геохимических ассоциаций. Выделенные геохимические ассоциации с помощью корреляционного анализа позволяют судить об источниках поступления различных микроэлементов в донные отложения. Согласно результатам проведенного обобщения многие элементы в донных отложениях рассматриваемой территории (Sr, Ga, Cr, Be, W, Sn и др.) имеют тесные связи с Ag и Co, что указывает на различные источники поступления элементов в донные отложения. Отсутствие значимых связей для Hg позволяет сделать вывод о едином типе источника данного элемента. В анализируемой выборке установлена также тесная связь Cd и Cu.

Изучение и мониторинг состояния водных объектов и донных отложений территории Березниковского городского округа с применением других подходов позволит дополнительно обосновать ассоциацию элементов и уровень загрязнения.

Литература

1. Зиганшин И.И. Донные отложения озер Республики Татарстан, 2005. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dissercat.com/content/donnye-otlozheniya-ozer-respubliki-tatarstan>.
2. Калинина Е.В., Рудакова Л.В., Дьяков М.С., Коробова Н.Е. Использование ресурсного потенциала донных отложений сооружений по очистке сточных вод предприятий химической отрасли г. Березники // Вестник ПНИПУ. Урбанистика, 2011. №4. С. 96-106.
3. Ковальчик Н.В., Смыкович Л.И., Карпиченко А.А. Распространенность и виды миграции химических элементов. Практикум по геохимии, 2017. С. 5-7.
4. Косинова И.И., Соколова Т.В. Методологические особенности оценки экологического состояния донных отложений искусственно созданных водных объектов // Вестник ВГУ. Геология. 2015. №3. С. 113-121.
5. Коновалова Э.Е. Анализ зарубежных методик содержания тяжелых металлов в донных отложениях рек // Международный студенческий вестник № 6, 2018 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=18282>.
6. Kowalska J. B. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination – A review, 2018 [Электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-018-0106-z>.
7. Максимович Н.Г., Первова М.С. Влияние перетоков минерализованных вод Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей на приповерхностную гидросферу // Инженерные изыскания, январь 2012. С. 22-28.

8. Machowski R, RzetalaMartyna A., Rzetala M, SolarSKI M. Anthropogenic enrichment of the chemical composition of bottom sediments of water bodies in the neighborhood of a non-ferrous metal smelter (Silesian Upland, Southern Poland), 2019 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-51027-w>.
9. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
10. Савельева А.С., Черненко Н.А. Проверка значимости для коэффициента корреляции // Международный студенческий вестник №3-1, 2018.
11. Соколова Т.В. Методика интегральной эколого-геохимической оценки донных отложений искусственно созданных водных объектов в условиях природного и техногенного воздействия, 2015 [Электронный ресурс]. URL: [http://ens.mil.ru/files/morf/military/files/Dissertaciya_Sokolova\(1\).pdf](http://ens.mil.ru/files/morf/military/files/Dissertaciya_Sokolova(1).pdf).
12. Tomlinson D.L., Wilson J.G., Harris C.R., Jeffrey D.W. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index, 1980 [Электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF02414780.pdf> (дата обращения 24.03.2020).
13. Ушакова Е.С., Перевоицкова А.Д., Волкова М.А. Оценка содержания микроэлементов в донных отложениях Березниковского городского округа (Пермский край) // Геология и полезные ископаемые Западного Урала, номер 3, 2020. С. 243-251.
14. Хайрулина Е.А., Максимович Н.Г. Влияние стоков солеотвала калийного предприятия на химизм приповерхностной гидросферы // Геохимия ландшафтов и географии почв. Доклады Всероссийской науч. конф. Москва, 2012. С. 340-342.
15. Хайрулина Е.А. Воздействие фильтрационных вод шламохранилища с соледержащими отходами на поверхностные и подземные воды // Географический вестник, 2018. С. 145-155.
16. Хайрулина Е.А. Формирование окислительных геохимических барьеров в местах выхода на поверхность высокоминерализованных подземных вод // Геология и полезные ископаемые Западного Урала, 2014. С. 93-95.
17. Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). Москва, 2002.
18. Weissmannova H.D., Pavlovsky J. Indices of soil contamination by heavy metals – methodology of calculation for pollution assessment (minireview), 2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-017-6340-5>.
19. Zglobicki W., Telecka M., Skupinski S., Pasierbincka A., Koziel M. Assessment of heavy metal contamination levels of street dust in the city of Lublin, Poland, 2018 [Электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-018-7969-2>.

МЕТОД ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОЧВ ТЕРРИТОРИИ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

И.С. Помеляйко

ООО «Нарзан-гидроресурсы», 357700, Россия, Ставропольский край, г. Кисловодск, ул. Кирова, 43.
E-mail: i.pomelyayko@yandex.ru

Современный город представляет собой сложную, локальную, упорядоченную в пространственно-временном отношении природно-техническую систему (ПТС). Необходимой основой функционирования ПТС является её удовлетворительное экологическое состояние (ЭС). Своевременная полная идентификация и диагностика территории ПТС способна выявить, оценить, установить причинно-следственные связи и свести к минимуму загрязнение природных сред токсичными микрочастицами. Для достижения данной цели объект должен быть максимально изучен на основе собранной информации полученной в результате экологического мониторинга (ЭМ). Итогом ЭМ является расчет некоего комплексного показателя характеризующего качество исследуемой природной среды. Для расчета данного показателя, необходимо сопоставление результатов аналитических измерений контролируемых веществ с их регламентируемыми величинами. В связи с этим при проведении ЭМ, регламентируемые величины загрязняющих веществ (ЗВ) имеют огромное значение. В большинстве природных сред – атмосфера, поверхностная и подземная гидросфера, в качестве данных величин выступает предельно допустимая концентрация (ПДК) химического вещества. Особняком стоит оценка степени химического загрязнения почв, для которой в РФ используют 3 расчетных показателя. Их основным различием является величина к которой приводят фактическое содержание элемента (С) в почве данной территории. В первом случае концентрация химического вещества приводится к его ПДК (ОДК) [4, 8], во втором к фоновому содержанию [4, 8, 14], в третьем – к кларку данного элемента в почве [5].

Необходимо отметить, что нормативы ПДК и ОДК разработаны на основе комплексных экспериментальных исследований опасности опосредованного воздействия вещества на здоровье человека, с учетом его токсичности, эпидемиологических исследований и международного опыта нормирования. Только в случае применения данных нормативов можно сделать вывод о безопасности данной территории для жизни и здоровья населения. Согласно [6] почвы, в которых обнаружено превышение 1 ПДК, должны быть отнесены к сильно- либо среднезагрязненным. Основным недостатком гигиенических нормативов ПДК и ОДК является незначительное число загрязняющих веществ для которых они разработаны. Так СанПиН 2.1.3684-21 [14] лимитирует валовое содержание ПДК 32 и ОДК всего 8 химических веществ. В результате, допустимые концентрации в почве для таких загрязняющих веществ как, – бериллий, барий, бор, висмут, молибден, олово, селен, стронций, отсутствуют.

Согласно МУ 2.1.7.730-99 и СанПиН 2.1.3684-21 концентрации в почве ЗВ сравнивают с их фоновыми уровнями (Ф) либо кларками (К). Массовая доля тяжелых металлов (ТМ) на уровне 3 Ф или более служит показателем загрязнения почвы данным ТМ. Согласно СанПиН 2.1.7.1287-03, чем выше концентрация и класс опасности ТМ в почве тем больше она загрязнена.

Расчёт суммарного критерия загрязнения почв $K_{почв}$ с учетом ПДК (ОДК) автор предлагает рассчитывать по формуле:

$$K_{почв} = \left(\frac{C_1}{ПДК_{C1}} \right) * N_1 + \left(\frac{C_2}{ПДК_{C2}} \right) * N_2 \dots + \left(\frac{C_n}{ПДК_{Cn}} \right) * N_n \quad (1)$$

где $C_{1,n}$ – среднесуточные концентрации отдельных компонентов загрязнения, присутствующих в атмосферном воздухе, мкг/м³; ПДК_{C1, Cn} – ПДК отдельных компонентов загрязнения атмосферы; $N_{1,n}$ – весовой коэффициент, величина которого зависит от класса опасности вещества принимается 1,5 для 1 класса опасности, 1,3 - для 2 класса опасности, 1 - для 3 класса опасности, 0,85 - для 4 класса опасности.

При расчете для городов-курортов в формулу (1) вводится поправка, вместо ПДК_{C1, Cn} принималось 0,8 ПДК_{C1, Cn} поскольку к данным территориям предъявляются повышенные экологические требования.

Расчет суммарного показателя загрязнения Z_{ϕ} (с учетом фона) рассчитывается по формуле [8]:

$$Z_{\phi} = \sum_{i=1}^n (K_{c_i} + \dots K_{c_n}) - (n - 1) \quad (2)$$

где K_c – коэффициент концентрации вещества; n - число суммируемых элементов.

Формула (2) имеет определенные ограничения. Ее с осторожностью следует применять в случае, когда почвы обеднены микроэлементами, а фоновая концентрация тяжелых металлов (ТМ) ниже предела обнаружения. Применение фоновых значений при оценке ЭС современного города приводит в большинстве случаев к очень высокому показателю загрязнения почв Z_{ϕ} . При корректно выбранном фоновом участке, расхождение между показателями фона и почв в черте города может разниться в 100 и более раз. Согласно разработанной оценочной шкале [8], показатель загрязнения почв Z_{ϕ} , позволяет выделить зоны риска для здоровья населения.

Для населения, переезжающего из районов с низкими фоновыми массовыми долями ТМ в почвах в техногенные районы с их высокими фоновыми массовыми долями и еще не адаптировавшегося к местным условиям, рекомендуется [5] применять оценку степени опасности загрязнения почв ТМ, установленную по показателю загрязнения Z_k .

Расчет суммарного показателя загрязнения Z_k (с учетом кларков) рассчитывался по формуле [5]:

$$Z_k = \sum_{i=1}^n (K_i + \dots K_n) - (n - 1) \quad (3)$$

где K – коэффициент концентрации вещества; n - число суммируемых элементов.

Показатель загрязнения почв Z_k , подобно показателю $K_{почв}$ позволяет привести фактические концентрации ЗВ к единым стандартизованным значениям данных веществ.

При эколого-геохимической оценке территории населенного пункта может применяться каждая из данных методик. Наибольшее распространение в последние годы получила оценка степени загрязнения почв с учетом фона (Z_{ϕ}). В идеале значения суммарных показателей загрязнения рассчитанные по трем данным методикам должны коррелировать между собой. В противном случае применение лишь одного из данных оценочных критериев ($K_{почв}$, Z_{ϕ} , Z_k) может привести к ложному заключению о степени опасности загрязнения почв исследуемой территории.

В рамках оценки экологического состояния городской территории, автором были выполнены геохимические исследования почв курортов КМВ – Кисловодска, Ессентуков, Пятигорска и Железноводска [9, 10, 13]. Были установлены ЗВ регулярно превышающие значения ПДК, фона и кларка в почвах курортов. Рассчитаны показатели позволяющие определить эколого-геохимическое состояние грунтов.

Отбор проб почв в пределах городской черты гг. Ессентуки, Железноводск, Пятигорск, Кисловодск, осуществлялся в течении 10 лет с 2011 по 2020 гг. Мониторинг грунтов осуществлялся методом ключевых участков с глубиной отбора 0,1 м. Пробы отбирались весной или осенью методом конверта. Размер конверта принимался 3×3 м. Пробы отбирались на всех регламентируемых функциональных зонах (ФЗ). Плотность отбора в рамках данного исследования составила 1 проба/5 км², что является допустимым поскольку были обследованы все функциональные зоны курортов. Количество опытных площадок (ОП) составило: в Кисловодске – 14, Ессентуках – 14, Пятигорске – 14, Железноводске – 12. С каждой площадки отбиралась одна объединённая проба, составленная из 5 точечных. Химический анализ грунтов выполнялся по 21 показателю. Это вещества 1–2 класса опасности – Pb, Hg, Cd, Zn, Ni, Be, Cu, As, F; вещества с повышенным в почвах региона КМВ природным содержанием – Ba, Sr; индикаторы различного вида загрязнений (нефтепродукты, фосфаты, Al, NH₄⁺, NO₃⁻, Se, Mn); показатели радиоактивности пород зоны аэрации (цезий-137, стронций-90); кислотность среды (рН). Всего было выполнено 540 эколого-геохимических анализов. Все определения проводились методом эмиссионного анализа в аккредитованной лаборатории аналитического центра г. Ессентуки, являющейся филиалом Государственного регионального центра стандартизации, метрологии и испытаний в г. Пятигорске. За фон принимались параметры грунта, отобранного на юго-востоке г. Кисловодска в курортном парке на горе Малое Седло высотная отметка 1219 м. Такая

территория получает минимальное антропогенное воздействие и является автономной. Полученный аналитический материал был подвергнут статистической обработке и сгруппирован по функциональным зонам в программных пакетах Microsoft Excel. Почвенно-геохимическое картографирование выполнено в пакете Corel DRAW X6.

Средний уровень pH в исследованных грунтах составляет 7,6 единиц (слабощелочная реакция среды). При данной реакции среды [6] свинец имеет низкую относительную подвижность, цинк – очень низкую, а кадмий вообще не переходит в подвижное состояние. Грунты курортов КМВ хорошо сорбируют ТМ. По данным Кабата-Пендиас [7] первый период полуудаления ТМ, сильно варьирует: для Zn — от 70 до 510 лет, для Cd — от 13 до 1100 лет, для Си — от 310 до 1500 лет и для Рb — от 740 до 5900 лет. Необходимо обратить внимание и на повышенное содержание в почвах курортов КМВ бария (2800 мг/кг) и стронция (240 мг/кг). По мнению ряда исследователей [1,2] в России опасность бария в почвах недооценена. Избыток бария, особенно в сочетании с избытком стронция, что свойственно почвам региона КМВ, может привести к нарушению кальциевого обмена и тяжелому поражению костной системы.

На следующем этапе исследования было выполнено сопоставление химического загрязнения ТМ почв селитебных зон Кисловодска [11, 12, 13], Ессентуков, Пятигорска и Железноводска с аналогичными показателями рассчитанными для 31 крупного промышленного города РФ по трём оценочным критериям ($K_{почв}$, $Z_{ф}$, $Z_{к}$).

Согласно принятому ранжированию[3], города-курорты КМВ – Ессентуки, Железноводск и Кисловодск – отнесены к 1-й категории с благополучной ЭС. К данной категории отнесены только 7 городов РФ. К 4-й (26% городов РФ), с напряженной и 5-й (9%), с критической ЭС, категории, отнесены такие крупные промышленные, аграрные центры, узлы авиалиний, шоссейных и железнодорожных путей, как: Архангельск, Благовещенск, Волгоград, Воронеж, Москва, Омск, Пермь, Самара, Саратов, Уфа, Челябинск и др. Концентрация химических элементов в почвах селитебных зон данных городов сравнивалась с аналогичными данными полученными по курортам КМВ. Анализировалось средневзвешенное содержание валовых форм тяжелых металлов 1-2 классов опасности (Pb, Cd, Hg, Zn, Ni, Cu) в селитебных функциональных зонах городов. Выбор этих шести ТМ был обусловлен тем, что во-первых для них разработаны соответствующие ПДК (ОДК) в почвах, во-вторых данные ЗВ включены в стандартный перечень веществ подлежащих определению [11, 12, 13, 14]. Данные для расчетов были взяты из ежегодников загрязнения почв, из отчетов о государственном мониторинге опубликованном в статьях в научных журналах и из авторефератов диссертаций. Во всех городах опробовалась верхняя часть почвенных отложений 0-20 см, то есть максимально трансформированный слой, непосредственно контактирующий с поверхностью. Почвы селитебных зон всех рассматриваемых в статье городов, относятся к группе – слабощелочных (pH 7,0 - 7,5).

Для оценки степени взаимосвязи трёх оценочных показателей между собой были построены графики взаимосвязи (Рис. 1). Наибольшие коэффициенты корреляции получены при использовании степенной линии, уравнения которых представлены на Рис. 1.

Наиболее сильная прямая связь, коэффициент корреляции (R) равный 0,820 установлена между переменными $K_{почв}$ и $Z_{к}$. Величины коэффициента корреляции (R) равная 0,703 между оценочными параметрами $Z_{ф}$ и $Z_{к}$ также свидетельствует о прямой сильной корреляционной связи. Коэффициент корреляции между оценочными показателями $K_{почв}$ и $Z_{ф}$ (R=0,470) соответствует прямой средней корреляционной связи.

На следующем этапе исследования было выполнено ранжирование городов по трём ($K_{почв}$, $Z_{ф}$, $Z_{к}$) оценочным показателям загрязнения почв (табл. 1, Рис. 2).

По величине ранга города делились на 3 группы: 1-высоко опасная категория (ВК) загрязнения почв; 2– опасная категория (ОК) загрязнения почв; 3- допустимая категория (ДК) загрязнения почв. Соответственно верхние 15 городов, которые выделены в табл. 2 темно-оранжевым цветом были отнесены к 1 категории, города с рангом от 16 до 31 отнесены ко 2 категории и отмечены желтым цветом, а светло-зеленым цветом помечены города 3 категории с ранговым номером от 32 до 35.

Анализируя результаты ранжирования можно сделать следующие выводы:

1. Ранг ряда городов – Архангельск, Барнаул, Таганрог, Омск, Новочеркасск, Ижевск, Москва по разным оценочным показателям существенно отличается друг от друга. К примеру, категория загрязнения почв г. Барнаула, варьирует от высоко опасной ($Z_{ф}$), до опасной ($Z_{к}$) и допустимой ($K_{почв}$).

2. По всем 3 оценочным критериям ($K_{почв}$, Z_{ϕ} , $Z_{к}$) к 1-й (высоко опасной) категории загрязнения почв отнесены 11 городов: Иркутск, Пенза, Челябинск, Екатеринбург, Саратов, Уфа, Волгоград, Владивосток, Новосибирск, Пермь, Владивосток; ко 2-й (опасной) категории загрязнения почв отнесены 8 городов: Санкт-Петербург, Воронеж, Кисловодск, Кемерово, Томск, Самара, Вологда, Петрозаводск; к 3-й (допустимой) категории загрязнения почв отнесен 1 город Эссенуки.

3. Таким образом, только для 20 из 35 городов выявлена сходимость значений суммарных показателей загрязнения рассчитанных по трём методикам, что составляет 57% от общего числа.

4. Кларковое и фоновое содержание элементов в почвах ряда городов существенно различаются. Для большинства городов (20 из 35) характерно соотношение $Z_{\phi} > Z_{к}$. К ним могут быть отнесены такие города, как: Казань (1,7 раз), Вологда (1,9 раз), Кисловодск (2 раза), Барнаул (2,3), Архангельск (2,4 раза), Москва (2,5 раз), Благовещенск (2,5 раз), Железноводск (4,2 раза). Почвы, являющиеся для данных городов фоновыми, содержат существенно меньшие концентрации химических веществ (Pb, Cd, Hg, Zn, Ni, Cu) чем их кларковые величины. Для городов – Саратов, Омск и Оренбург справедливо обратное соотношение $Z_{к} > Z_{\phi}$. Соответственно в этих городах почвы фона содержат в 1,5-2 раза больше Pb, Cd, Hg, Zn, Ni, Cu, чем величины их кларков в почвах мира.

5. Согласно разработанной оценочной шкале по 3 суммарным показателям загрязнения почв, селитебные зоны 31 города соответствуют **высоко опасной и опасной** категории загрязнения.

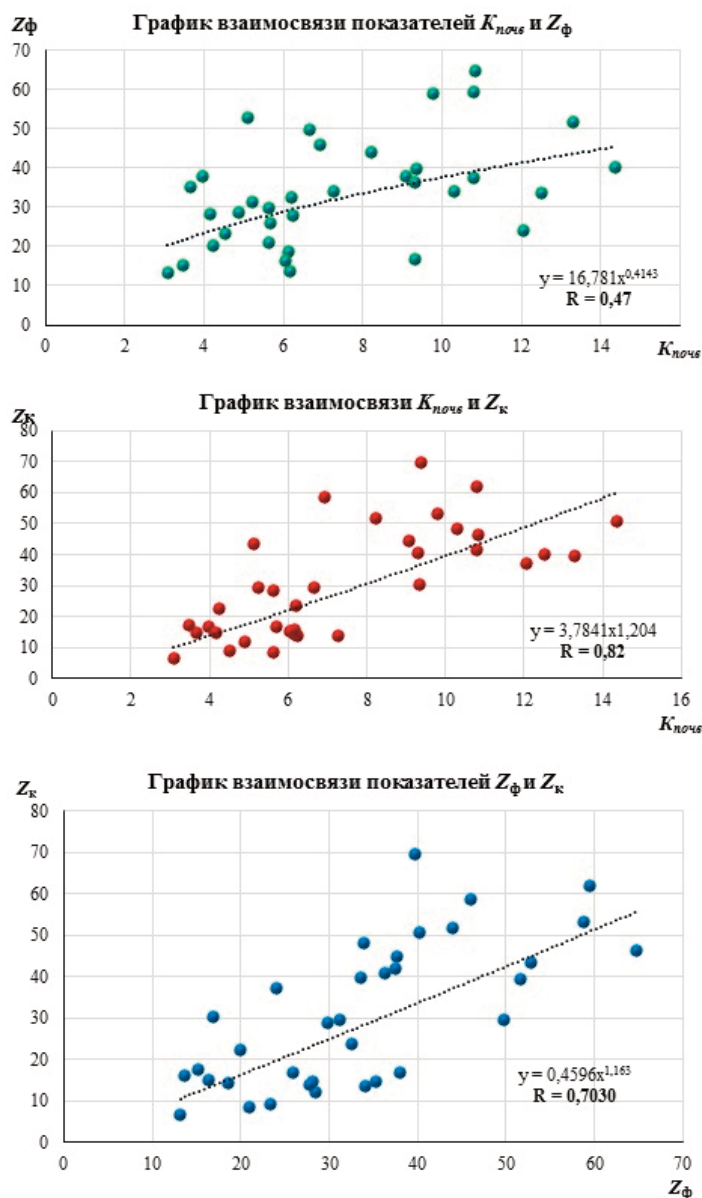


Рис. 1. Графики взаимосвязи оценочных критериев суммарных показателей загрязнения почв:
1 – $K_{почв}$ и Z_{ϕ} ; 2 – $K_{почв}$ и $Z_{к}$; 3 – Z_{ϕ} и $Z_{к}$.

Таблица 1.

Оценочная шкала ранжирования ряда ПТС РФ по 3 оценочным показателям загрязнения почв

Город	Z _ф		Город	K _{почв}		Город	Z _к
Челябинск	64,7		Пенза	14,4		Саратов	69,5
Екатеринбург	59,5		Уфа	13,3		Екатеринбург	61,9
Иркутск	58,9		Тольятти	12,5		Н.Новгород	58,6
<i>Ижевск</i>	52,8		<i>Омск</i>	12,1		Иркутск	53,0
Уфа	51,6		Челябинск	10,8		Волгоград	51,8
<i>Казань</i>	49,7		Новосибирск	10,8		Пенза	50,6
Н.Новгород	46,0		Екатеринбург	10,8		Ульяновск	48,2
Волгоград	44,0		Ульяновск	10,3		Челябинск	46,2
Пенза	40,3		Иркутск	9,8		Владивосток	44,6
Саратов	39,8		Саратов	9,4		<i>Ижевск</i>	43,3
<i>Барнаул</i>	38,0		Оренбург	9,3		Новосибирск	41,7
Владивосток	37,7		Пермь	9,3		Пермь	40,7
Новосибирск	37,4		Владивосток	9,1		Тольятти	39,8
Пермь	36,3		Волгоград	8,2		Уфа	39,4
<i>Архангельск</i>	35,3		<i>Москва</i>	7,3		<i>Омск</i>	37,0
<i>Москва</i>	34,1		Нновгород	6,9		Оренбург	30,1
Ульяновск	33,9		<i>Казань</i>	6,7		Томск	29,5
Тольятти	33,6		Кисловодск	6,3		<i>Казань</i>	29,3
СПб	32,5		СПб	6,2		Воронеж	28,6
Томск	31,3		<i>Новочеркасск</i>	6,2		СПб	23,6
Воронеж	29,8		Самара	6,1		Петрозаводск	22,3
Пятигорск	28,5		<i>Таганрог</i>	6,0		Йошкар-Ола	17,3
Вологда	28,1		Кемерово	5,7		Кемерово	16,9
Кисловодск	27,8		Воронеж	5,6		<i>Барнаул</i>	16,7
Кемерово	25,9		Благовещенск	5,6		<i>Новочеркасск</i>	15,9
<i>Омск</i>	24,1		Томск	5,2		<i>Таганрог</i>	15,1
Железноводск	23,4		<i>Ижевск</i>	5,1		Вологда	14,6
Благовещенск	21,0		Пятигорск	4,9		<i>Архангельск</i>	14,6
Петрозаводск	20,0		Железноводск	4,5		Самара	14,4
Самара	18,6		Петрозаводск	4,2		Кисловодск	13,9
Оренбург	16,9		Вологда	4,2		<i>Москва</i>	13,6
<i>Таганрог</i>	16,0		<i>Барнаул</i>	4,0		Пятигорск	11,9
Йошкар-Ола	15,3		<i>Архангельск</i>	3,7		Железноводск	9,2
<i>Новочеркасск</i>	13,6		Йошкар-Ола	3,5		Благовещенск	8,5
Ессентуки	13,1		Ессентуки	3,1		Ессентуки	6,5

Примечание: жирным курсивом выделены те города, ранг которых по разным оценочным критериям ($K_{почв}$, $Z_{ф}$, $Z_{к}$) существенно различается.

При данном показателе загрязнения грунтов увеличивается как общая заболеваемость населения, так и число детей с хроническими заболеваниями и нарушениями сердечно-сосудистой системы. Наименьший показатель загрязнения выявлен в грунтах Ессентуков. Только почвы селитебной зоны этого города, относятся к категории – *допустимая*, что характеризуется наиболее низким уровнем заболеваемости детей и минимальной частотой встречаемости функциональных отклонений.

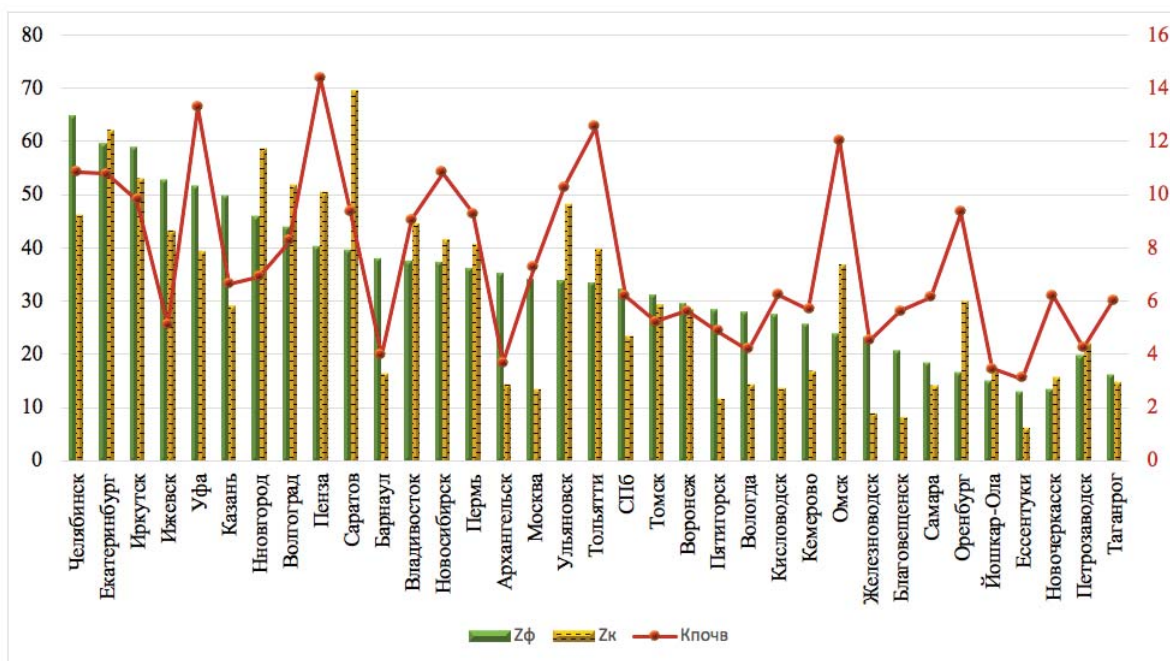


Рис. 2. Диаграммы загрязнения почв ряда городов РФ построенные с учетом различных оценочных показателей ($K_{почв}$, $Z_{ф}$, $Z_{к}$).

6. Величина суммарного показателя загрязнения почв с учетом ПДК (ОДК) – $K_{почв}$ и величина суммарного показателя загрязнения почв с учетом фона – $Z_{ф}$ не обладают достоверной корреляционной связью.

7. Среднее содержание ЗВ в почвах курортов Кисловодск и Пятигорск практически соответствует их концентрации в крупных промышленных городах с напряженным и критическим экологическим состоянием.

Подводя итог всему вышеизложенному, можно отметить, что при эколого-геохимической оценке ПТС, особенно его селитебных зон, применение лишь одного из оценочных критериев ($K_{почв}$, $Z_{ф}$, $Z_{к}$) может привести к ложному заключению о степени опасности загрязнения почв. На сегодняшний день для достоверной оценки ЭС почв городской территории необходимо использование всех трёх оценочных критериев. При существенном расхождении полученных значений необходимо ориентироваться на величину суммарного показателя загрязнения почв $K_{почв}$, поскольку только он отражает воздействия данного уровня загрязнения исследуемой территории на здоровье человека. В перспективе необходима разработка ПДК (ОДК) для тех химических элементов, которые в настоящее время их не имеют. Учитывая специфику и народнохозяйственное значение, а также запреты действующие в 1 и 2 зонах санитарной охраны городов-курортов КМВ для них должны быть разработаны специальные нормативы ПДК (ОДК), либо должны применяться специально разработанные весовые коэффициенты пересчета.

Литература

1. Dbyjuhfljd F/G/ Utj[bvzb hlrb[b hfctzyys['ktvtynjd d gjxdff/ V/^ Bpl-dj FY CCCH? 1957/ 238 c/
2. Водяницкий Ю.Н. Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах // Почвоведение. 2012. № 3. С. 368-375.
3. Города России: энциклопедия / Гл. ред. Г.М. Ланно. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 1998. 559 с.
4. ГОСТ 17.4.3.06-86. Охрана природы. Почвы. Общие требования к классификации почв по влиянию на них химических загрязняющих веществ. М.: Изд-во стандартов, 1986. 3 с.
5. Ежегодник. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2018 году. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2020. 114 с.
6. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.

7. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 439 с.
8. МУ 2.1.7.730–99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. М.: Минздрав России, 1999.
9. Помеляйко И.С. Оценка эколого-геохимического состояния пород зоны аэрации курорта Кисловодск // Известия вузов. Геология и разведка. 2012. № 2. С. 42-48.
10. Помеляйко И.С. Системный анализ экологического состояния зоны гипергенеза урбанизированных территорий (на примере курорта федерального значения Кисловодска): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пятигорский государственный гуманитарно-технологический университет, 2012. 21 с.
11. Помеляйко И.С. Эколого-геохимическое ранжирование селитебных зон ряда курортных и промышленных городов РФ по трем оценочным показателям загрязнения почв // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2017. № 1. С. 28-39.
12. Помеляйко И.С., Лопатина Т.Н. Сравнительный анализ экологического состояния крупных промышленных городов РФ и курорта федерального значения // Социология города. 2015. № 2. С. 55-75.
13. Помеляйко И.С., Помеляйко В.И. Комплексная антропогенная нагрузка на городскую территорию ряда крупных промышленных городов и курортов федерального значения России // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. М.: 2016. № 1. С. 47-55.
14. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. М.: 2021. 75 с.

ВЛИЯНИЕ АУТИГЕННЫХ ПЛЕНОК НА ПОГЛОЩАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К СВИНЦУ

И.А. Родькина, Е.Н. Самарин

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1.

E-mail: irina-rodkina2007@yandex.ru, samarinen@mail.ru

Введение

Физико-химическая активность дисперсных грунтов проявляется в их способности участвовать во взаимодействиях с различными веществами, таких как химические реакции разной направленности, протекающих в грунтах при изменении внешних условий, в том числе и сорбционных равновесиях. Достаточно хорошо химические свойства изучены для глинистых грунтов, несколько хуже - для органо-минеральных комплексов. Тем удивительнее что, несмотря на многочисленные экспериментальные работы в области грунтоведения, геохимии, почвоведения, биогеохимии и коллоидной химии, песчаные грунты до сих пор испытывают дефицит внимания исследователей. Это связано, прежде всего, с тем, что кварцевый песок не способен сорбировать на себе какое-либо вещество в достаточных количествах в силу очень низкого заряда поверхности, при этом абсолютно не учитывается роль природных аутигенных минералов, находящихся в небольшом количестве на поверхности песчаных зерен.

Таким образом, целью настоящего исследования являлось изучение поглощающей способности песчаного грунта с природными пленками и песчаных модельных грунтов с различными аутигенными пленками.

Объекты и методы исследования

В качестве вещества, по отношению к которому изучалась поглотительная способность, был выбран свинец (в составе нитрат), который не обладая никакими биологическими функциями, является одним из наиболее опасных, с точки зрения влияния на нормальную жизнедеятельность живых организмов, металлов, а также токсичен для живых организмов при любых концентрациях.

Природный песок. Все экспериментальные исследования проводились на песках морского генезиса (J₃v₂ – Московская область, карьер г. Люберцы, глубина отбора 20 м), средней крупности (по ГОСТ 25100-2020), чистый, хорошо отсортированный, $d_{60}/d_{10} = 2,3$, $d_{50} = 0,35$ мм. Песчаные зерна представлены преимущественно кварцем средней окатанности, содержание которого, - по данным Е. Н. Огородниковой - достигает 99,5% легкой фракции. На долю полевого шпата приходится не более 0,5%.

Природный песок имеет зерна бесцветные, прозрачные, хорошо отсортированные, средней окатанности (Рис. 1а). Среди общей массы встречаются отдельные зерна молочно-белого цвета, с неровной шероховатой поверхностью, а также отдельные зерна с неровными острыми краями. К неровностям поверхности, как правило, приурочены отдельные примазки (особенно в углублениях) железистых минеральных образований. Однако, толщина аутигенных пленок настолько мала, что отчетливо просматривается прозрачность отдельных зерен. Зерна прозрачного кварца как правило окатаны хуже, хотя для них характерна большая однородность. Поверхность их неровная, с большим количеством мелких каверн. В целом для песчаных частиц характерно неравномерное распределение минеральных пленок на поверхности (Рис. 1).

Содержание карбонатов (по методу В. Е. Соколовича) – 0,65%, органического углерода (мокрым сжиганием) – 0,04%, подвижной кремниевой кислоты (по К. К. Гедройцу) – 0,96%, подвижных соединений полуторных элементов: Fe₂O₃ – 0,60% (солянокислая вытяжка), Al₂O₃ – 1,53 % (щелочная вытяжка по методике К.К. Гедройца) [1, 2].

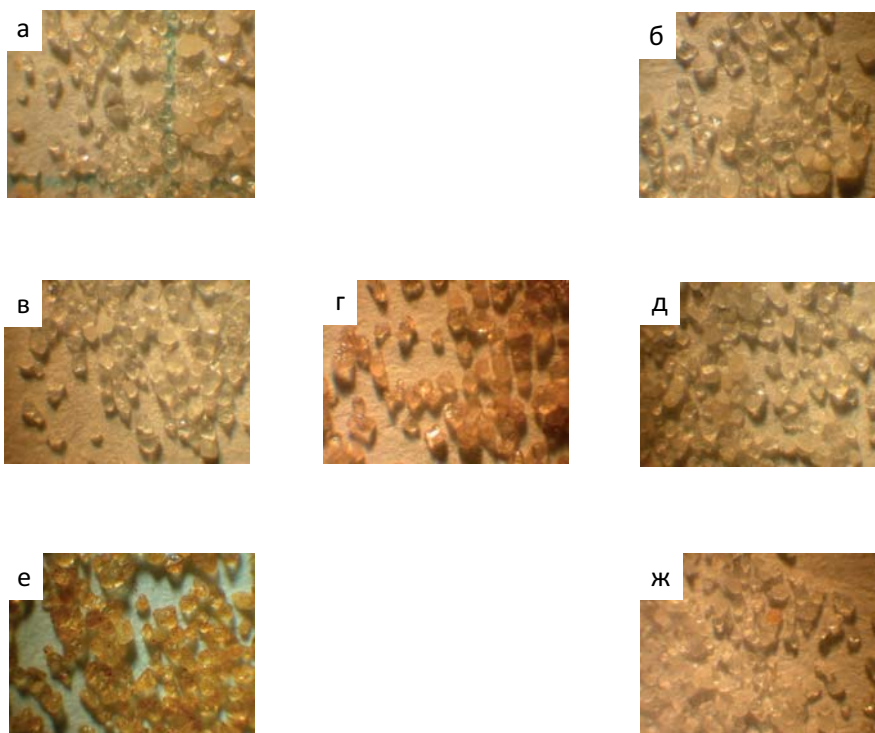


Рис. 1. Зерна кварца в исследованном песке (J_3V_2 - Московская область, карьер г. Люберцы, глубина отбора 20м, увеличение 30*
а) в природном образце; б) очищенные от природных пленок; в) с искусственно нанесенной карбонатной пленкой; г) с искусственно нанесенной пленкой гумата калия; д) с искусственно нанесенной пленкой гидроксида алюминия; е) с искусственно нанесенной пленкой гидроксида железа; ж) с искусственно нанесенной пленкой аморфного кремнезема.

Сорбция свинца изучена на всех образцах изучалась в статическом режиме, в диапазоне концентраций свинца в равновесном растворе от 0,1 н до 0,000001 н, при рН 3-5, при соотношении песок — раствор 1:10. Подробно методика проведения эксперимента и приготовления контактирующих растворов описана в [3, 4, 5, 6, 7].

Методика фракционирования поглощенного свинца. Различные формы сорбированного свинца определялись последовательной экстракцией серией реагентов в три стадии. Подробно методика эксперимента описана в [3, 4, 5, 6, 7].

Эксперименты по сорбции свинца природным не очищенным от пленок песком, как и ожидалось, показали, что он обладает достаточно высокой поглощающей способностью по отношению к свинцу в расчете на кг образца, и достаточно низкими значениями - при пересчете на грамм вещества пленки (см. Табл.1).

Для проведения экспериментов на песчаных грунтах с искусственно нанесенными поверхностными пленками природный песок был трижды обработан 5% раствором HCl (при соотношении песок: кислота 1:10). Качество удаления природных аутигенных пленок контролировалось под бинокуляром (Рис. 1б), а также аналитическими методами. Что может свидетельствовать о том, что в процессе пробоподготовки удалось полностью удалить минеральные пленки с поверхности песчаных зерен.

Искусственные мономинеральные пленки (по методике, разработанной Л.А. Евдокимовой) наносились путем осаждения таким образом, чтобы в количественном соотношении они соответствовали природным образцам.

Приготовление карбонатной пленки. При постоянном перемешивании сливались растворы $CaCl_2$ (3г/л) и Na_2CO_3 (3г/л) в объеме по 50 мл. Смешивание производилось быстро, для создания в растворе наибольшего пересыщения по кальциту, что гарантировало выпадение тонко дисперсного осадка. Свежеосажденный карбонат кальция, образующийся в результате реакции: $CaCl_2 + Na_2CO_3 \rightarrow 2NaCl + CaCO_3 \downarrow$, - в виде дисперсного порошка, наносился на поверхность песчаных зерен, после удаления надосадочной жидкости, путем добавления навески песка и последующего перемешивания до гомогенного состояния. В дальнейшем приготовленный образец отмывался

Таблица 1.

**Зависимость количества сорбированного свинца и константы адсорбции от генезиса
поверхностной пленки, нанесенной на песок**

Тип поверхностной пленки	рН	Вещество пленки, %		Максимальное количество сорбированного Рb, в пересчете на		Константа адсорбции	Толщина пленки, мкм
		До взаимодействия	После взаимодействия	вещество пленки, мг/г	массу образца, мг/кг		
Силикатная (SiO ₂ x nH ₂ O)	3,0	1,66	1,66	3,5	57	0,09	1,14
	4,0		1,66	22,0	362	0,04	
	5,0		1,66	29,2	482	0,03	
Карбонатная (CaCO ₃)	3,0	1,68	1,03	5,2	53	0,09	0,96
	4,0		1,20	26,6	320	0,04	
	5,0		1,25	68,4	856	0,02	
Железистая (Fe(OH) ₃)	3,0	2,90	2,90	3,4	98	0,09	1,26
	4,0		2,90	18,1	525	0,04	
	5,0		2,90	62,7	1820	0,01	
Алюминиевая (Al(OH) ₃)	3,0	2,00	2,00	3,1	62	0,09	1,27
	4,0		2,00	20,1	402	0,04	
	5,0		2,00	59,4	1188	0,01	
Органическая (гумат калия)	3,0	0,18	0,18	35,0	63	0,03	0,26
	4,0		0,18	151,1	272	0,007	
	5,0		0,18	200,0	360	0,006	
Природный песок	3,0	Σ = 3,78	Σ = 3,70	1,7	62	0,007	
	4,0		Σ = 3,75	10,3	385	0,003	
	5,0		Σ = 3,78	13,8	520	0,002	

Примечание: ПДК для почвы 30,0 мг/кг (СП 502.1325800.2021).

насыщенным раствором CaCO₃ до отсутствия качественной реакции на Cl⁻ (по AgNO₃), и высушивался при комнатной температуре (р/р_s » 0,5-0,6). Количественно карбонаты определялись ацидиметрически по методике В.Е. Соколовича [2].

Приготовление железистой пленки. Железо осаждалось 10% раствором аммиака из насыщенного раствора FeCl₃ (100мл). Полученный осадок отфильтровывался и отмывался от избытка хлорида аммония дистиллированной водой до отсутствия качественной реакции на Cl⁻. После чего осадок перемешивался с кварцевым песком и высушивался при комнатной температуре. Количественное определение железа проводилось в солянокислой вытяжке [1], по методам Тамма [2], Тесье [5], Мера-Джексона [5].

Приготовление алюминиевой пленки. Раствор AlCl₃ (100 мл) доводился до кипения, затем Al(OH)₃ осаждался 10% раствором аммиака. Осадок отфильтровывался и отмывался дистиллированной водой до отсутствия качественной реакции на Cl⁻. Песок после перемешивания с осадком высушивался при комнатной температуре. Количество Al₂O₃ в приготовленном образце определялось двумя методами: 1) в щелочной вытяжке по К.К.Гедройцу [1]; 2) в кислой вытяжке по ксиленовому оранжевому [1].

Приготовление силикатной пленки. Для приготовления силикатной пленки был использован силикат натрия с плотностью 1,13 г/см³, к которому добавлялась 5% соляная кислота, при соотношении жидкое стекло : кислота = 2:1. Через 7 мин образовался гель, который также отмывался дистиллированной водой до отсутствия качественной реакции на Cl⁻, после чего наносился на поверхность песчаных зерен перемешиванием, затем песок высушивался при комнатной температуре. Количество SiO₂ в образце песка определялось ацидиметрически по методике В.Е.Соколовича.

Приготовление органической пленки. Для приготовления органической пленки было взято 200 г чернозема обыкновенного (Ростовская область), который методом декантации обрабатывался 0,1 н раствором гидроксида калия. Гумат калия осаждался из фильтрата 1 н раствором H_2SO_4 и отмывался дистиллированной водой до отсутствия качественной реакции на SO_4^{2-} (по $BaCl_2$). Полученная пленка наносилась на кварцевые зерна перемешиванием после удаления надосадочной жидкости. Затем образец сушился при комнатной температуре. Количество углерода было определено методом мокрого сжигания по И.Н. Тюрину.

Качество поверхности частиц в модельных образцах контролировалось при помощи бинокля (Рис. 1). Распределение искусственно нанесенных пленок имеет несколько иной характер по сравнению с природным песком.

Можно говорить о том, что карбонат кальция не создает на поверхности кварцевых зерен сколько-нибудь заметных при использованных увеличениях скоплений. Нанесенная карбонатная пленка имеет очень незначительную толщину и в этом случае проявляется только увеличением общей матовости кварца. Другими словами, нанесенная карбонатная пленка характеризуется максимальной дисперсностью, то есть карбонат кальция буквально обволакивает всю поверхность отдельных зерен (Рис. 1в).

Распределение органического вещества - гумата калия - на поверхности песчаных зерен носит совершенно иной характер. Органическое вещество распределено на поверхности песчаных зерен относительно равномерно, однако при этом стремиться аккумулироваться на выступах поверхности: предпочтительно на острых сколах, углах и ребрах. Возможно, это связано с особенностями подготовки образца, когда песок добавлялся к осажденному из щелочного раствора гумату калия, высушенному до текучепластичной консистенции, а затем образец гомогенизировался в процессе перемешивания до однородной массы. Толщина органической пленки, как и в предыдущем случае, незначительна, что видно по просвечиванию песчаных зерен (Рис. 1г).

Пленка гидроксида алюминия также распределена относительно равномерно, то есть рельеф поверхности зерен не имеет решающего значения. В то же время поверхность частиц покрыта фрагментарно, хотя пленка, характеризуясь маленькой толщиной, имеет покровный характер (Рис. 1д).

Поведение гидроксида железа на поверхности песчаных зерен имеет совершенно другой характер: распределение пленки неравномерное, наблюдаются скопления вещества в углублениях и сколах образцов (Рис. 1е).

Искусственно нанесенная силикатная пленка распределена на большинстве образцов равномерно и имеет незначительную толщину, однако на некоторых частицах содержание силикатов резко увеличивается (Рис. 1ж).

Потенциометрическое титрование песков с различными поверхностными пленками, проведенное по общепринятой методике [5], показало, что для песка с карбонатной пленкой, в системе диагностируется один буферный интервал, находящийся в диапазоне от 5,90 до 4,90 рН, обусловленный растворением $CaCO_3$ [7]. Содержание $CaCO_3$ в образце, установленное по кислотно-основному равновесию, можно оценить в 1,5%, что хорошо согласуется с данными химического анализа. Значение pH_{ZPSE} соответствует 9,62, образец обладает постоянным положительным зарядом в 0,232 мг-экв/г.

Кривая титрования образца с органической пленкой характеризуется одним скачком в интервале от 5,40 до 6,20 единиц рН, что обусловлено диссоциацией карбоксильных групп гумата калия [5]. Содержание в образце органического вещества можно оценить приблизительно в 0,15%, что соответствует данным химического анализа. Значение pH_{ZPSE} равно 4,10, система обладает постоянным положительным зарядом +0,533 мг-экв/г. Низкие значения pH_{ZPSE} возможно обусловлены методикой экстракции гумата калия (осаждение соляной кислотой из 0,1 н вытяжки КОН).

Для песка с алюминиевой пленкой, скачек титрования находится в пределах 5,10-4,20 единиц рН, и отвечает растворению гидроксида алюминия [7], содержание которого оценивается приблизительно в 1,9%. Точка нулевого заряда фиксируется при рН 7,2, при этом поверхность практически не обладает постоянным зарядом. Необходимо отметить также, что в диапазоне рН 3-9 не наблюдается значимого изменения заряда поверхности: колебания значений σ_0 составляют -0,0004 - +0,0006 мг-экв/г для навески песка в целом или же в пересчете на Al_2O_3 - -0,02 - +0,03 мг-экв/г.

При титровании песка с железистой пленкой, скачок титрования наблюдается в интервале 4,0-4,2, что несколько выше ожидаемых данных. Это можно объяснить тем, что потенциометрическое

титрование велось не HCl, а оксалатным буфером (по методике Тамма) [4]. pH_{ZPSE} соответствует 5,5 единицам pH, при отсутствии постоянного заряда.

Для образца с силикатной пленкой скачек титрования находится в интервале 4,8-5,6 единиц pH. Точка нулевого заряда фиксируется при 6,8 pH. Поверхностный заряд постоянный, отрицательный, практически не зависит от изменения pH: колебания значений σ_0 составляют -0,001 - -0,009 мг-экв/г.

Потенциометрическое титрование природного образца песка с искусственно удаленными поверхностными пленками аналогично таковому для фонового электролита. Что же касается pH_{ZPSE} , то его значение в растворах нитрата калия составляет приблизительно 6,5. При этом заряд не постоянен и изменяется от +0,03 до -0,06 мг-экв/г в диапазоне от 6,1 до 7,0 pH.

Обсуждение результатов

Поглощение свинца происходит всеми типами экспериментально изученных поверхностных пленок, а его величина существенно зависит от pH контактирующего раствора (табл.1). Кварцевый песок, очищенный от природных типоморфных пленок, практически не проявляет сорбционной активности по отношению к растворам нитрата свинца во всем изученном диапазоне pH (максимальная сорбция свинца составляет 2 мг/кг при pH = 5).

Полученные результаты свидетельствуют, что даже при pH контактирующего раствора, равное 3, для всех исследованных пленок количество поглощенного свинца существенно и превышает ПДК для почв в 2-3 раза. С ростом pH до 5, превышение ПДК по свинцу составляет 10-30 раз.

Также необходимо отметить, что карбонатная пленка сохраняется на поверхности песчаных зерен во всем исследованном диапазоне pH, частично растворяясь при повышении кислотности контактирующих растворов. При pH контактирующего раствора 3 растворяется более 40%, при pH 4 - около 30%, а при pH 5 – приблизительно 25 % $CaCO_3$. По-видимому, сорбирующиеся соединения свинца ингибируют поверхность кальцита, препятствуя его полному растворению. Некоторое уменьшение количества вещества пленок после взаимодействия с кислыми растворами наблюдается и на образцах природного песка (прежде всего за счет выноса Fe^{3+} и Ca^{2+}).

Все полученные изотермы сорбции относятся к типу изотерм Ленгмюра [8]. Следовательно, можно предположить, что в условиях проведенных экспериментов объемной сорбции свинца в исследованных минеральных веществах не происходит. Это подтверждается еще и тем, что сорбционная емкость пленок не зависит от толщины пленки при условии полного покрытия. Таким образом, максимальное количество сорбированного свинца для всех типов пленок практически линейно зависит от pH, что подтверждается уравнением Курбатова [8]. По степени сродства свинца все исследованные поверхностные пленки можно расположить в ряд: органическая >> карбонатная > железистая @ алюминиевая > силикатная. Это подтверждается значениями констант сорбции при возрастании pH (табл.1).

Поведение органической пленки стоит несколько особняком. Во-первых, количество свинца, сорбирующегося на гумате калия, существенно превосходит таковое для остальных пленок, причем эта закономерность проявляется тем ярче, чем меньше значение pH контактирующего раствора.

Уменьшение сорбционной емкости дисперсных минералов по отношению к тяжелым металлам с понижением pH обычно трактуют как результат увеличения конкуренции со стороны ионов гидроксония [4], которые, стремясь к дополнительной протонизации поверхности, уменьшают количество реакционно способных поверхностных групп. Причем, чем больше разница между актуальным значением pH в контактирующем растворе и pH нулевого заряда поверхности, тем больший избыточный положительный заряд приобретает минеральная поверхность. Такая зависимость в явном виде прослеживается при pH контактирующих растворов 5,0 (Рис. 2).

В целом можно констатировать, что количество сорбированного свинца напрямую зависит от величины поверхностного заряда. Из графика несколько выбивается сорбция свинца на образце с карбонатной пленкой (если ее не рассматривать, то коэффициент корреляции анализируемой зависимости превышает 0,95). Возможно, это связано с тем, что при pH среды 5 происходит частичное растворение и вынесение из контактирующего раствора карбонатов, что подтверждается результатами химического анализа (табл.1). При значениях pH контактирующих растворов 3,0 и 4,0 указанная зависимость проявляется плохо, возможно, из-за высокой конкуренции иона гидроксония. Если исключить из рассмотрения органическое вещество, то для pH 3,0 и 4,0 значение точки нулевого заряда (в исследованном диапазоне) не влияет на количество сорбированного образцами свинца. Так при

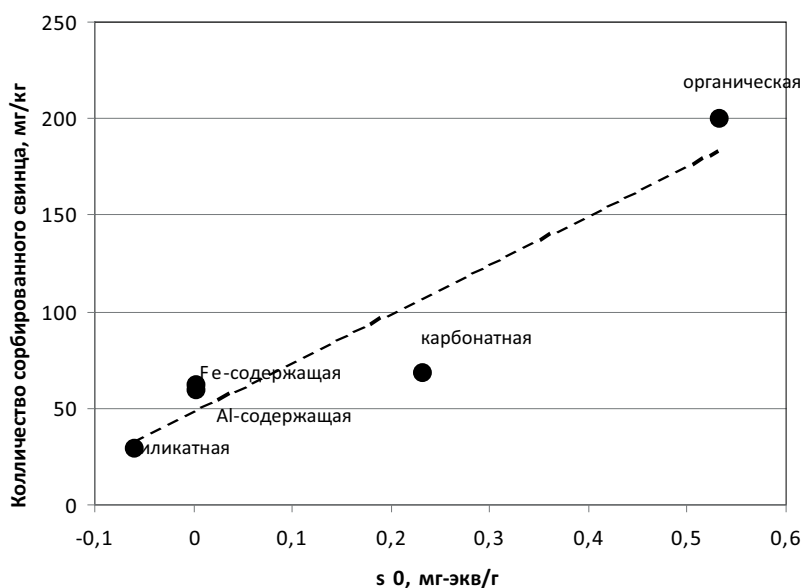


Рис. 2. Зависимость количества сорбированного при pH = 5 свинца от исходной величины поверхностного заряда.

изменении pH нулевого заряда минеральной поверхности от 5,5 до 9,6 количество сорбированного свинца меняется: от 3,1 до 5,2 мг/г вещества пленки при pH 3,0 и от 18 до 26 мг/г – при pH 4,0.

Органическое же вещество, у которого значение pH точки нулевого заряда 4,1 проявляет наибольшее сродство к свинцу при всех значениях pH контактирующих растворов (Рис. 3).

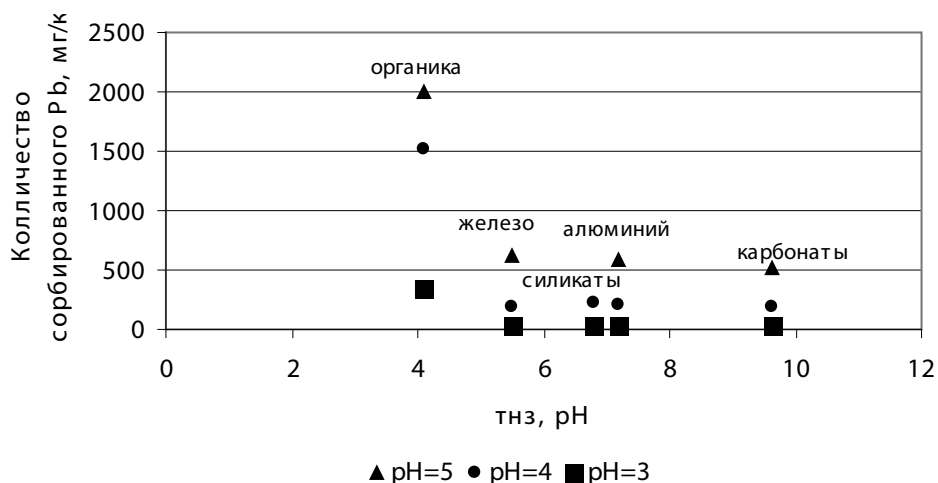


Рис. 3. Зависимость количества сорбированного свинца от pH точки нулевого заряда.

Эксперименты по экстракции (трехступенчатая обработка) убедительно показывают, что практически весь свинец, адсорбированный поверхностными пленками, способен повторно переходить в подвижное состояние: остаточное количество металла при экстракции реактивом Тамма не превышает 2-4 %. Тем не менее, характер десорбции несколько отличается у образцов с пленками различного состава.

При наличии карбонатной пленки весь свинец удаляется уже на второй стадии экстракции при обработке ацетатным буфером с pH – 5,2 и это, по-видимому, связано с растворением карбоната кальция [14]. В случае железистой и алюминиевой пленок экстракция протекает в две стадии: при обработке раствором хлорида магния удаляется 0,3-0,7 % сорбированного свинца, основная же масса удаляется при обработке образцов реактивом Тамма. Считается [3, 4, 5, 6, 7], что в первом

случае свинец связан с минеральной поверхностью обменно (неспецифическая сорбция), тем более что обе пленки имеют незначительный отрицательный поверхностный заряд. При обработке образцов реактивом Тамма прежде всего происходит растворение пленочных гидроксидов железа и алюминия, которое сопровождается освобождением свинца сорбированного на них.

Для образцов с органической и силикатной пленками десорбция свинца наблюдается на всех стадиях экстракции, использованных в эксперименте. Такая картина вполне очевидна для гумата калия, который имеет функциональные группы разного состава. Обращает на себя внимание только факт, что количество свинца, сорбированного гуматом калия обменно, не превышает 1-3%. Кроме этого, необходимо отметить, что реактив Тамма полностью растворяет гумат калия, что делает проблематичным его использование для фракционирования тяжелых металлов, сорбированных только на гидроокислах железа и алюминия.

В случае силикатной пленки уже при обработке образцов раствором хлорида магния десорбция свинца наблюдается в достаточно значительном количестве (10-20% от сорбированного), что позволяет сделать вывод о способности силикагеля удерживать свинец обменно. Наличие обменного комплекса у силикагеля обусловлено пространственной неупорядоченностью его структуры. Количество десорбированного соевым раствором свинца позволяет предположить, что величина ЕКО силикагеля составляет приблизительно 0,1-0,3 мг-экв./100 г.

На второй стадии экстракции удаляется приблизительно 15-30% свинца, причем степень экстракции несколько уменьшается с ростом количества сорбированного металла. Поскольку силикагель практически не реагирует с ацетатным буфером, то в данном случае десорбция свинца целиком обусловлена разрушением поверхностных комплексов, образующихся на энергетически активных центрах поверхности. В качестве таковых Р.Айлер [4] рассматривает силанольные радикалы вида Si-OH, в которых возможен частичный обмен на натрий по типу: $\text{Si-OH} + \text{Na}^+ \rightleftharpoons \text{Si-ONa}^+$. В первом случае при взаимодействии с растворами солей переходных металлов возможно образование так называемого внешнесферного шестикоординированного адсорбционного комплекса [4]: $\text{Si-OH-Pb(H}_2\text{O)}_5$. Освобождающийся гидроксил при этом расходуется на нейтрализацию избыточной кислотности контактирующего раствора.

На третьей стадии экстракции из образцов с силикатной пленкой удаляется 45-75% свинца. Нет сомнений, что эта фракция характеризуется наиболее сильной связью с поверхностью и, видимо, в данном случае речь следует вести о внутрисферных комплексах: $\text{Si-O-Pb(OH)(H}_2\text{O)}_4$. При образовании такого комплекса в контактирующий раствор высвобождается два гидроксил-иона. Удаление указанных поверхностных комплексов возможно как в результате обмена на ионы гидроксония в сильно кислых растворах, так, собственно, и при растворении сорбирующей фазы. Оба эти механизма, очевидно, имеют место при обработке образцов реактивом Тамма [3].

В случае природного песка десорбция свинца наблюдается на всех стадиях экстракции, поскольку все исследованные ранее минералы присутствуют в нем в качестве пленочных покрытий песчаных зерен.

Выводы

1. Все исследованные аутигенные пленки, нанесенные на поверхность песчаных зерен, проявили поглотительную способность по отношению к свинцу в диапазоне рН 3-5. При этом наличие в песках даже 1-2% аутигенных пленочных минералов в зависимости от рН приводит к сорбции свинца в количествах, сопоставимых или существенно превышающих значения ПДК для почв.

2. При низких значениях рН, в условиях высокой конкуренции со стороны ионов гидроксония, состав поверхностной пленки влияет на сорбцию свинца несущественно; различия проявляются только при рН 5. По количеству сорбированного свинца (мг/г вещества) поверхностные пленки можно расположить в следующей последовательности:

карбонатная > железистая @ алюминиевая > силикатная

Сорбция на гумате калия в десятки раз превышает таковую на других исследованных видах пленок.

3. При рН 3-4 величина поверхностного заряда и значения точки нулевого заряда вещества пленки не оказывает заметного эффекта на величину сорбции свинца. При рН=5 эта зависимость становится очевидной: количество сорбированного свинца практически пропорционально зависит от величины поверхностного заряда пленки и обратно пропорционально значению точки нулевого заряда.

4. Постадийные вытяжки по схеме Тессье лишь частично можно использовать при изучении селективности различных минералов по отношению к свинцу, поскольку они не обладают необходимой избирательностью на поздних стадиях экстракции.

Литература

1. Аринушкина Е.В. *Руководство по химическому анализу*. М.: Изд-во МГУ, 1971, 487с.
2. Воробьева Л.А. *Химический анализ почв*, М.: Изд-во МГУ, 1998. 272 с.
3. Родькина И.А., Самарин Е.Н. *Управление поглотительной способностью песчаных грунтов, Инженерно-геологическое и эколого-геологическое изучение песков и песчаных массивов //Труды Международной научной конференции (27-28 сентября 2018 г., МГУ, Москва, Россия). /Под ред. В.Т.Трофимова и В.А.Королева. М.: ООО «СамПринт», 2018, с. 42-47.*
4. Родькина И.А., Самарин Е.Н. *Научные основы создания сорбционных геохимических барьеров по отношению к свинцу на основе аминопласт-грунтовых композитных материалов, // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, М.: Изд-во Моск. ун-та, №2, 2015, с. 98-103.*
5. Родькина И.А., Самарин Е.Н., Ларионова Н.А. *Влияние состава аутигенных пленок на сорбцию свинца в песках. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, М.: Наука, №3, 2009, с. 248-257.*
6. Родькина И.А., Самарин Е.Н. *Изучение процессов сорбции свинца на минеральных поверхностях различной природы. // Материалы 8-й межвузовской научной конференции Школа экологической геологии и рационального недропользования, С.-П., 2007, с. 245-246*
7. Rodkina I.A., Samarin E.N. *Scientific essentials of developing geochemical sorption barriers against lead based on aminoplastic ground composite materials. // Moscow University Geology Bulletin, USA: Allerton Press Inc. 70, № 2, 2015, p. 171-176*
8. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. *Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. //Analytical chemistry. 1979. Vol 51. p.844-851.*

Оценка самореабилитации территории Левихинского рудника по данным индекса NDVI

П.А. Рыбников^{1,2}, Л.С. Рыбникова^{1,2}, Д.А. Бузина^{1,2}, А.Ю. Смирнов¹

¹Институт горного дела УрО РАН, 620075, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58,

²Уральский государственный горный университет, 620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30. E-mail: ribnikoff@yandex.ru

Введение

Левихинская группа медноколчеданных месторождений расположена в Кировградском районе Свердловской области. Месторождения были открыты в 20-30-х годах прошлого века. В 1927 г. началась их эксплуатация открытым способом, вместе с этим выполнялись работы по закладке шахт для разработки месторождений подземным способом. С 2003 г. началась ликвидация рудника посредством затопления горных выработок. К 2007 г. подземные выработки были затоплены, оборудование шахтных стволов полностью демонтировано, на северном фланге рудника сформировался техногенный водоем, куда разгружаются шахтные воды. После закрытия рудника была восстановлена станция нейтрализации, где кислые шахтные воды перемешиваются с известковым молоком. В настоящее время на месторождении сложилась достаточно сложная экологическая ситуация. Левихинский рудник является объектом накопленного вреда окружающей среды [8, 9, 10].

Цель исследования – осуществление мониторинга растительного покрова на отвалах, расположенных в районе Левихинского рудника, с использованием разновременных космических снимков среднего пространственного разрешения.

Изменения природной среды, связанные с открытыми горными работами, в большей степени касаются растительного покрова. Характерным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность, характеризующая большими различиями в отражении излучения разных длин волн. Отражательные свойства растительного покрова в основном зависят от следующих факторов: 1) оптических свойств зеленых листьев; 2) геометрии растений, особенно индекса листовой поверхности и углового распределения листьев; 3) отражательной способности поверхности почвы, если растения не образуют сплошного покрова; 4) структуры растительного покрова, т. е. пространственного распределения растений [7].

Для дистанционной и оперативной оценки состояния растительности нами был выбран индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный индекс растительности (количественный показатель фотосинтетически активной биомассы). Он позволяет отследить динамику накопления фитомассы в течение вегетационного периода и основывается на анализе отражательной способности растительности в различных областях спектра [6].

Объекты и методы исследования

При изучении территории Левихинского рудника нами использовались мультиспектральные снимки со спутника Landsat-5 и Landsat-8. Они были получены с официального сайта геологической службы США. Мультиспектральные съемочные системы формируют несколько отдельных изображений для широких спектральных зон в диапазоне электромагнитных излучений от видимого до инфракрасного [4]. Мультиспектральные снимки состоят примерно из 5–10 полос относительно большой полосы пропускания (70–400 нм) и характеризуются высоким пространственным, но низким спектральным разрешением [2].

Алгоритм для расчета NDVI был разработан еще в 1973 г. Д.Роузом – директором Центра дистанционного зондирования из Техасского университета. Индекс NDVI вычисляется по следующей формуле [1]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра; RED – отражение в красной области спектра.

Отношение показателей NIR и RED позволяет четко отделять растительность от других природных объектов. Индекс может принимать значения от -1 до 1. Для растительности NDVI принимает положительные значения, чем больше зеленая фитомасса, тем индекс выше [3, 6]. Когда растительного покрова на поверхности земли нет, значения индекса минимальны. Показатель индекса возрастает летом, так как в это время наблюдается большое количество фотосинтетически активной биомассы [5].

Нами NDVI определялся для оценки степени восстановления растительного покрова на 11 отвалах, расположенных в районе Левихинского рудника (Рис. 1).



Рис. 1. Расположение отвалов на территории Левихинского рудника.

Вычисление NDVI было выполнено в программном продукте QGIS через функцию «Калькулятор растров», которая позволяет проводить любые вычисления с каналами снимков. В нашей работе использовались снимки за 1985, 1995, 2006, 2016 и 2020 годы, полученные в конце августа и в начале сентября.

Результаты исследований

По результатам определения NDVI (табл. 1) было видно, что после ликвидации Левихинского рудника (в 2003 году) показатели вегетационного индекса начали изменяться.

Для лучшей визуализации в программном продукте QGIS слой со значениями индекса NDVI был отредактирован с применением градиентной шкалы. На рисунке 2 приведена схема, отображающая значения NDVI за 1985 и 2020 гг.

Таблица 1.							
Изменение индексов NDVI для отвалов Левихинского рудника							
№ и наименование отвала	площадь, га	Значение NDVI по годам					Изменение за 1985-2020 гг.
		1985	1995	2006	2016	2020	
1 (Южный)	22,6	0,03	0,02	0,03	0,07	0,08	0,05
2 (ш. «Центральная»)	0,10	0,09	0,03	0,10	0,19	0,21	0,12
3 (ш. «Центральная»)	0,09	0,13	0,09	0,17	0,25	0,28	0,15
4 (ш. «Центральная»)	1,82	0,02	0,02	0,02	0,11	0,13	0,11
5 (ш. «Центральная»)	1,85	0,05	0,03	0,07	0,14	0,17	0,12
6 (ш. «Левиха II»)	0,48	0,12	0,06	0,21	0,31	0,34	0,22
7 (ш. «Левиха II»)	1,32	0,09	0,06	0,09	0,21	0,22	0,13
8 (ш. «Первомайская»)	1,33	0,04	0,03	0,06	0,17	0,14	0,10
9 (ш. «Первомайская»)	0,41	0,05	0,04	0,09	0,13	0,13	0,08
10 (ш. «Левиха XIV»)	0,20	0,08	0,06	0,10	0,16	0,21	0,13
11 (ш. «Левиха XIV»)	0,26	0,09	0,07	0,13	0,16	0,20	0,11

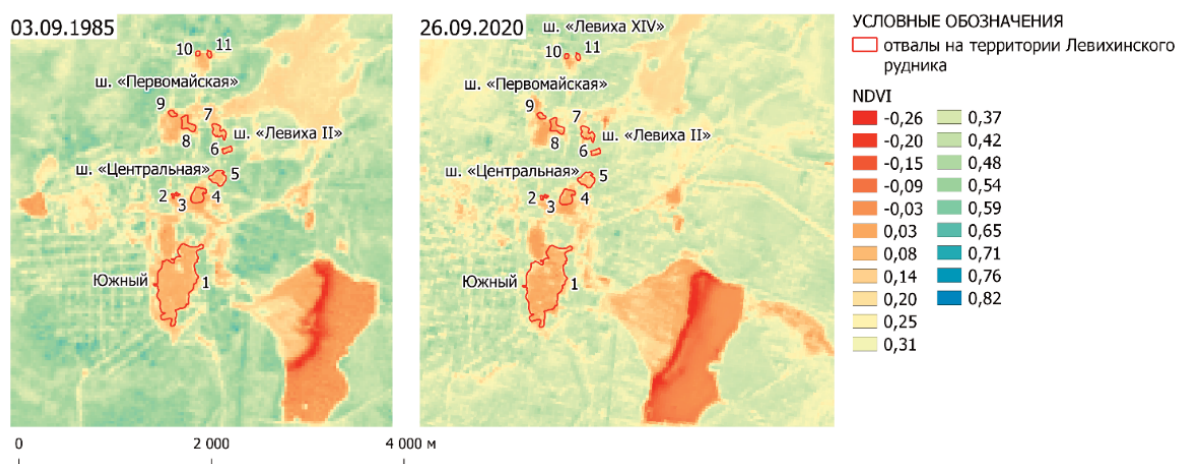


Рис. 2. Схема районирования территории Левихинского рудника по значениям индекса NDVI.

В табл. 2 приведены значения индекса NDVI и соответствующими им типы растительного покрова, в соответствии с ней на отвалах начала появляться разреженная растительность (преимущественно травы, кустарники).

Таблица 2.	
Значения NDVI и соответствующие им типы растительного покрова [12]	
Значение NDVI	Тип растительности
от -1 до 0,1	вегетация отсутствует
от 0,1 до 0,2	открытая почва
от 0,2 до 0,4	разреженная растительность
от 0,4 до 0,6	умеренная растительность
от 0,6 до 1	густая растительность

По сравнению с 2006 г. индекс NDVI за 2020 год (табл. 1) увеличился для небольших отвалов № 2, 3 (ш. «Центральная»), № 6, 7 (ш. «Левиха II») и № 10, 11 (ш. «Левиха XIV»). Значения NDVI у этих отвалов характерны для умеренной растительности и свидетельствует о постепенном восстановлении растительного покрова. Однако для некоторых отвалов № 1 (Южный), № 4, 5 (ш. «Центральная») и № 8, 9 (ш. «Первомайская») за 14 лет отмечается медленное увеличение биомассы.

В соответствии с табл. 1 на Рис. 5 показано изменение значений индекса NDVI за 1985-2020 гг.

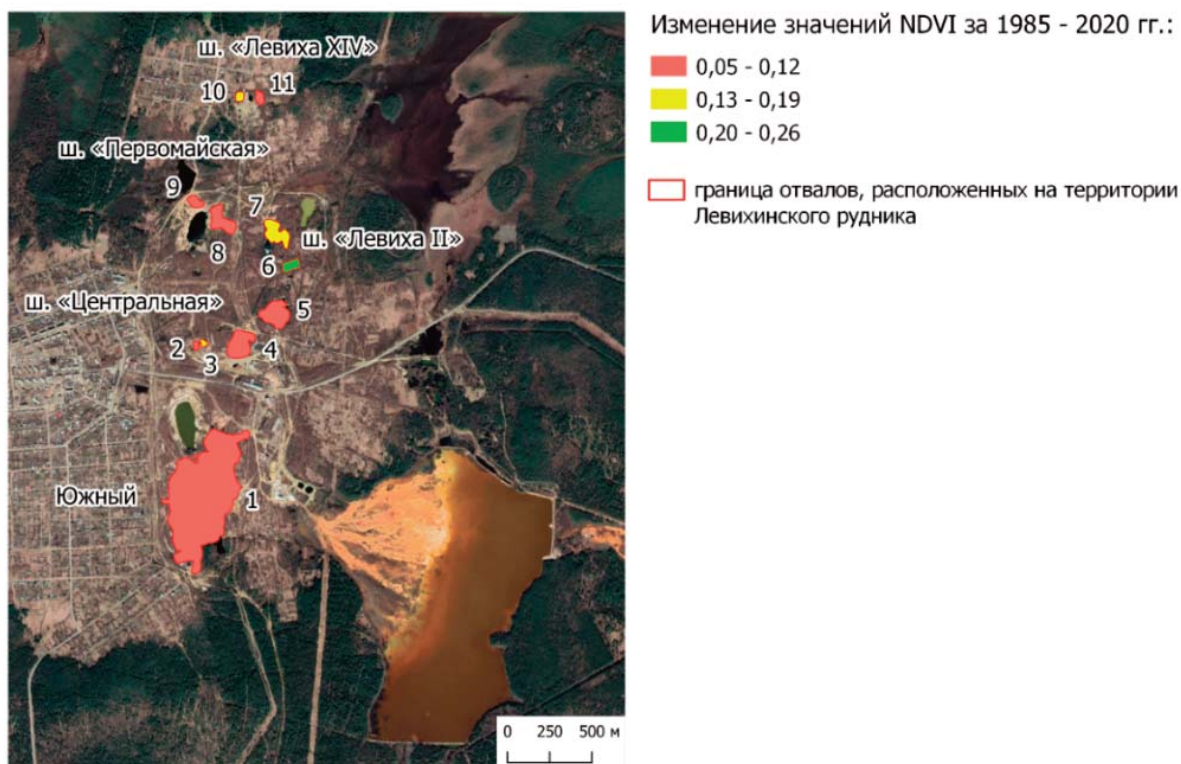


Рис. 5. Схема изменения значений NDVI за 1985-2020 гг. на отвалах Левихинского рудника.

На значения индекса NDVI оказывает влияние низкое пространственное разрешение снимков со спутника Landsat, которого может быть недостаточно для отображения редкой растительности на отвалах № 1, 4, 5, 8, 9.

Кроме того, на северо-западе исследуемой территории расположено болото Пороховое. Во время функционирования рудника в него осуществлялся сброс кислых шахтных вод до строительства пруда-осветлителя в 1957 г. [9]. Индекс NDVI для территории, прилегающей к болоту, приведен в табл. 3.

Таблица 3.					
Данные индекса NDVI для болота Пороховое					
прилегающая к болоту территория	Значение NDVI по годам				
	1985	1995	2006	2016	2020
	0,20 - 0,36	0,22- 0,3	0,28 - 0,40	0,30 - 0,48	0,33 - 0,48

NDVI для болота Пороховое за 1985 год и 1995 год изменился незначительно, постепенное увеличение наблюдалось с 2006 по 2020 год на 0,13-0,18 (табл. 3). Данные вегетационного индекса показали, что к 2020 году территория вокруг болота покрылась умеренной растительностью, вместе с этим постепенно уменьшилась и площадь болота (табл. 3, Рис. 4).

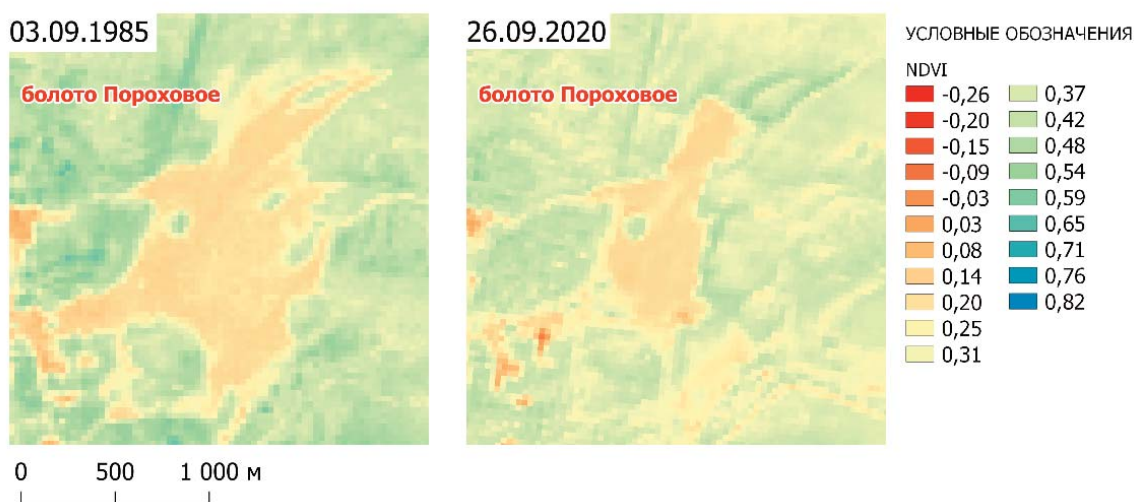


Рис. 4. Схема районирования территории болота Пороховое по значениям индекса NDVI.

Выводы

Применение спутниковых данных, благодаря наличию множества спектральных каналов, позволяет достичь высоких результатов в задачах оценки состояния растительного покрова. Мульти-спектральные снимки, получаемые в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра, обладают высокой информативностью. Известная периодичность поступления спутниковой информации позволяет проследивать многолетние процессы в природных экосистемах. В настоящее время космические снимки являются актуальной информацией для мониторинга территорий с напряженной экологической ситуацией [11].

С использованием мультиспектральных снимков нами была проведена оценка растительного покрова на отвалах по данным NDVI и проанализировано состояние болота Пороховое. Из-за сброса кислых шахтных вод прилегающая к болоту территория долгое время была полностью выжжена. Однако по данным NDVI она начала покрываться растительностью. Анализ полученных значений вегетационного индекса за 2020 год показал, что на поверхности отвалов присутствует травянистая и кустарниковая растительность. Степень зарастания отвалов постепенно увеличивается с момента ликвидации рудника, что подтверждается данными NDVI, однако процесс восстановления земель будет затяжным. Самозарастание отвалов имеет важное средостабилизирующее значение, так как пыление отвалов серьезно воздействует на окружающий ландшафт. Именно поэтому необходимо уделять особое внимание изучению динамики растительного покрова на горно-промышленных территориях.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГД УрО РАН по теме № 0328-2019-0005.

Литература

1. Адамович Т. А. Изучение сезонной динамики вегетационного индекса NDVI по данным Landsat // Перспективы развития научных исследований в 21 веке: материалы XIII междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 99-100.
2. Антонова В. А. Возможности гиперспектрального дистанционного зондирования // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2019. № 11-2. С. 35-38.
3. Замалитдинова М. Г., Ткачева И. П., Ергалиев Д. С., Сейткожина А. Исследование изменения растительности в зоне Аральского моря на основе космических снимков с использованием вегетационного индекса NDVI // Вестник Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева. 2019. № 3 (128). С. 32-38.
4. Колесникова О. Н., Черепанов А. С. Возможности ПК ENVI для обработки мультиспектральных гиперспектральных данных // Геоматика. 2009. № 3. С. 24-27.

5. Комаров А.А. Оценка состояния травостоя с помощью вегетационного индекса NDVI // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2018. № 51. С. 124-129.
6. Оплетаев, А. С., Жигулин В. А., Косов В. А. Использование вегетационного индекса NDVI для оценки состояния лесных насаждений на нарушенных землях // Леса России и хозяйство в них. 2019. № 3 (70). С. 15-23.
7. Петрицев В. П., Дубровская С. А., Ряхов Р. В. Сравнительный анализ состояния растительности в г. Оренбурге по результатам обработки мультиспектральных космических снимков // Проблемы региональной экологии. – 2014. – № 4. – С. 213-217.
8. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Лёвихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // Геохимия. 2019. Т. 64. № 3. С. 282-299. DOI 10.31857/S0016-7525643282-299.
9. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А. Гидрогеологические исследования в горном деле на постэксплуатационном этапе // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2018. – № 4. – С. 25-39. – DOI 10.1134/S0869780318040105.
10. Рыбникова, Л. С., Рыбников П.А. Особенности формирования запасов месторождений подземных вод, эксплуатируемых дренажными системами на горно-складчатом Урале // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2015. № 3. С. 204-219.
11. Харазми Р. С., Чаблан Л. Н. Анализ динамики экосистем бассейна Систан по результатам автоматизированной обработки космических мультиспектральных снимков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. № 4. С. 94-100.
12. Чащин А. Н., Кондратьева М. А. Использование данных дистанционного зондирования для оценки темпов самозарастания угольных отвалов Кизеловского бассейна // Географический вестник. – 2019. – № 2 (49). – С. 135-147.

ГИДРОГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ОТРАБОТАННОГО ЛЕВИХИНСКОГО МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО РУДНИКА (СВЕРДЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Л.С. Рыбникова, П.А. Рыбников, В.Ю. Наволокина, А.Н. Галин

ИГД УрО РАН, г. 620075 Россия, Свердловская обл., Екатеринбург, ул.Мамина-Сибиряка 58.
E-mail: luserib@mail.ru; ribnikoff@yandex.ru

Горнодобывающая деятельность приводит к формированию природно-технических систем. Закрытие рудников выявило специфические проблемы, связанные с медленными процессами самореабилитации и высоким уровнем загрязнения гидросферы. На Среднем Урале в бассейне р. Тагил расположено несколько затопленных рудников, на которых продолжают формироваться кислые шахтные воды (Рис. 1). Несмотря на нейтрализацию, сточные воды загрязняют гидросферу металлами. Их концентрации в поверхностных водах превышают предельно-допустимые в десятки и сотни раз.

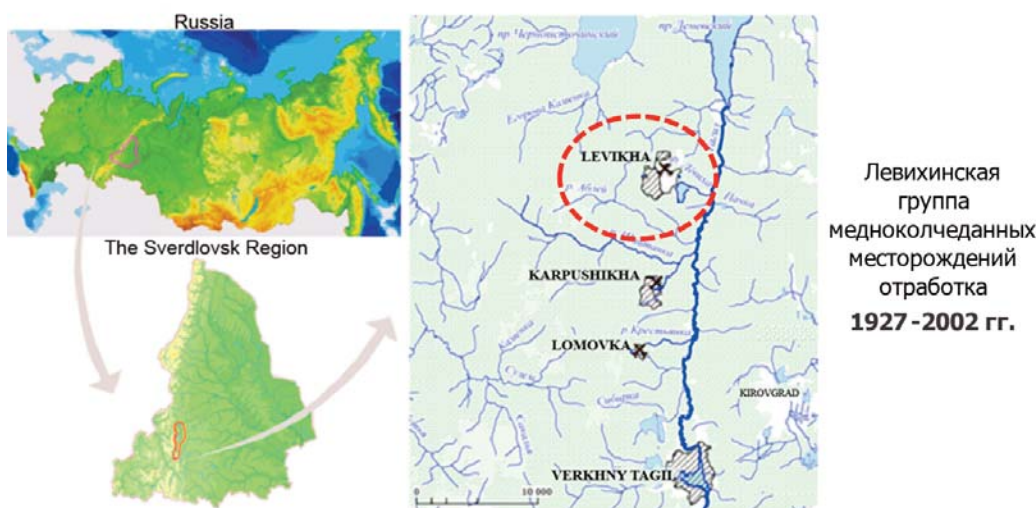


Рис. 1. Расположение затопленных рудников в бассейне р. Тагил.

Геоэкологическую обстановку в районе Левихинского рудника определяют несколько объектов: затопленные карьеры, зона сосредоточенной разгрузки шахтных вод (техногенный водоем в провале), отвалы, подотвальные воды, пруд-осветлитель, сброс с пруда в р. Левиху, разгрузка поверхностных и подземных вод в р. Тагил с площади водосбора [1, 2].

Основным участком выхода подземных вод на поверхность с апреля 2007 года является провал (зона обрушения) в районе шахты Левиха-II, где в результате сосредоточенной разгрузки подземных вод сформировался техногенный водоем глубиной до 37 м объемом около 76 тыс. м³ (Рис. 2). Шахтные воды из провала перекачиваются на станцию нейтрализации. Расход откачки варьирует от 15 л/с в межень до 30 л/с в паводок (в среднегодовом разрезе около 20 л/с (в 2 раза меньше величины шахтного водоотлива при отработке).

На территории Левихинского рудного поля расположено 11 отвалов общей площадью 0,3 км² объемом 1,7 млн м³. Самый большой из них (объемом 1,5 млн м³) находится в южной части возле шахты Левиха-XII (Рис. 3). Отвалы сложены пустыми вмещающими породами, содержащими вкрапленные сульфиды, и вскрышными породами, представленными рыхлыми покровными отложениями из карьеров. Среднегодовой расход подотвальных вод составляет 1,1-1,3 л/с.

Для снижения экологической нагрузки на гидросферу и предотвращения поступления неочищенных кислых вод в водотоки на отработанном Левихинском руднике организован сбор шахтных и подотвальных вод, их нейтрализация известковым молоком, отстаивание в пруду-



Рис. 2. Техногенные объекты, определяющие геоэкологическую обстановку в районе Левихинского рудника.

осветлителя, повторная нейтрализация при сбросе из пруда. Применяемая в настоящее время система достаточно эффективна для удаления алюминия и железа (95-98%), для марганца и сульфатов степень очистки не более 43-45% [3].

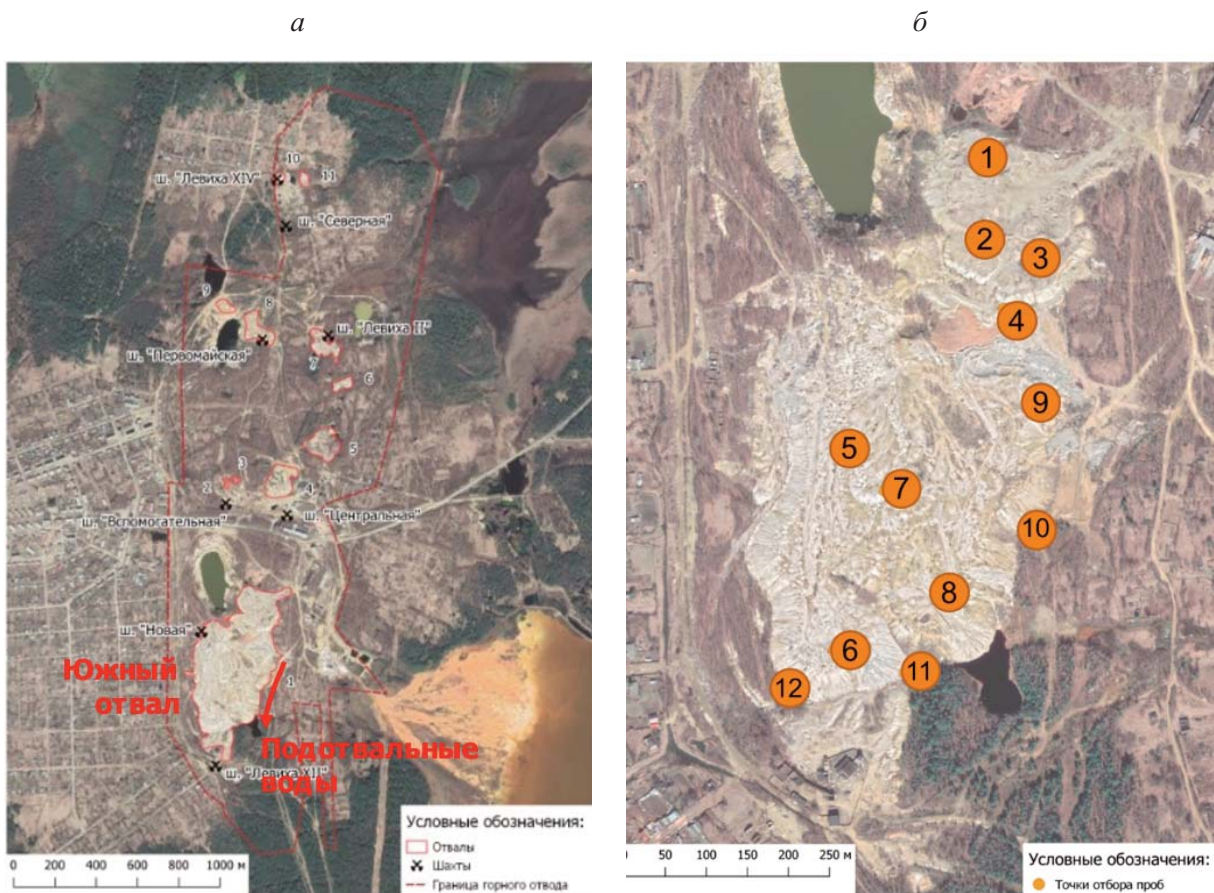


Рис. 3. Расположение отвалов на бывшем горном отводе Левихинского рудника (а) и точки опробования на отвале Южный (б).

Аналогичные проблемы проявляются на большинстве отработанных месторождений, содержащих сульфидную минерализацию [4]. Для очистки кислых вод применяется, как правило, комбинированная система очистки, включающая активные и пассивные методы [5].

Одним из важных элементов системы очистки кислых вод является пруд-осветлитель, построенный в 1959 г. Согласно паспорту гидротехнического сооружения, общий объем пруда-осветлителя составляет 3,2 млн м³, при этом полезный объем к настоящему времени не более 1,1 млн м³. Проектное накопление осадка при влажности 98% составляет ~92 тыс. м³/год, соответственно, полезная емкость пруда-осветлителя может быть исчерпана в ближайшие годы.

Для обоснования мероприятий по минимизации негативного влияния на окружающую среду в районе отработанного Левихинского рудника ИГД УрО РАН по заданию Министерства природных ресурсов Свердловской области выполняет оценку современного гидрогеоэкологического состояния компонентов окружающей среды.

Для оценки состава техногенных отходов в ходе работ были отобраны 12 проб пород из отвала (Рис. 3а) и 6 проб из пруда-осветлителя (Рис. 4).

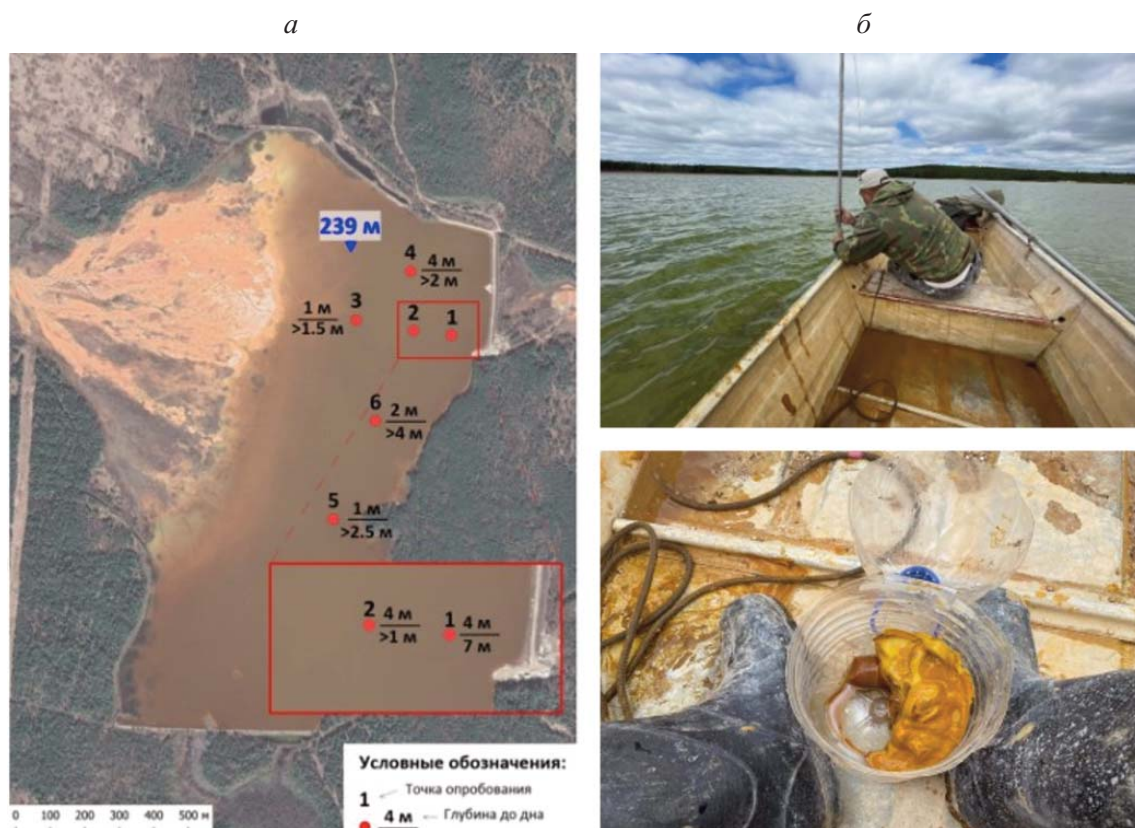


Рис. 4. Точки опробования на акватории пруда-осветлителя (а) и технология отбора проб (б).

Образцы для проведения анализа минералогического и химического состава были отправлены в Сектор наноминералогии и Центр коллективного пользования уникальным научным оборудованием Пермского государственного национального исследовательского университета.

Целью работы было:

1) изучение гранулометрического состава рыхлых отвалов и ила пруда-осветлителя методами ситового рассева и лазерной дифракции частиц;

2) определение минерального отвалов и ила пруда-осветлителя методом рентгеноструктурного анализа;

3) определение химического состава отвалов, ила и воды пруда осветлителя рентгенофлуоресцентным и масс-спектральным с индуктивно связанной плазмой методами.

По данным гранулометрического анализа во всех пробах с рыхлым материалом отвала содержится большое количество щебня (20-60%), состоящего из обломков пород размером более 10 мм и повышенное содержание алевроито-глинистого материала (до 30%). Рыхлый материал из отвала, наряду с крупными обломками, представлен в пробах 2, 4, 6, 7 и 8.

С учетом того, что значительную роль в поглощении многих токсичных элементов играет тонкодисперсная часть отвалов, изучен гранулометрический состав глинисто-алевритовой части по дробной размерной шкале. Результаты свидетельствуют об одномодальном распределении этих частиц по крупности с отчетливо выраженной модой в узкоразмерных классах 12,5-16,0 мкм для проб 4, 6, 7, и 20,0-25,0 мкм - для проб 2 и 8.

Пробы из отвалов весьма разнообразны по минеральному составу (Рис. 4а). Пробы 1 и 9 существенно отличаются от других проб. Проба 1 имеет глинисто-сульфатно-карбонатный состав, а проба 9 – кварцево-сульфидный. Остальные пробы состоят преимущественно из кварца, полевых шпатов и глинистых минералов в разных пропорциях. Во всех пробах (кроме пробы 9) зафиксировано присутствие хлорсодержащих солей (сильвина и карналлита), сульфатов (бассанита и гипса). Наибольшее количество глинистых минералов 68,8% и минералов солей 10,1% отмечается в составе пробы 12. Сульфиды представлены пиритом и отмечены также во всех образцах, кроме проб 8 и 12. В пробах 1-4, 9 и 12 присутствуют рентгеноаморфные минералы (такие как лимонит и прочие).

Особенностями химического состава проб отвалов рудника являются повышенная железистость и сернистость, обусловленная высокими содержаниями гидроксидов железа, сульфатов и нередко пирита (Рис. 4б).

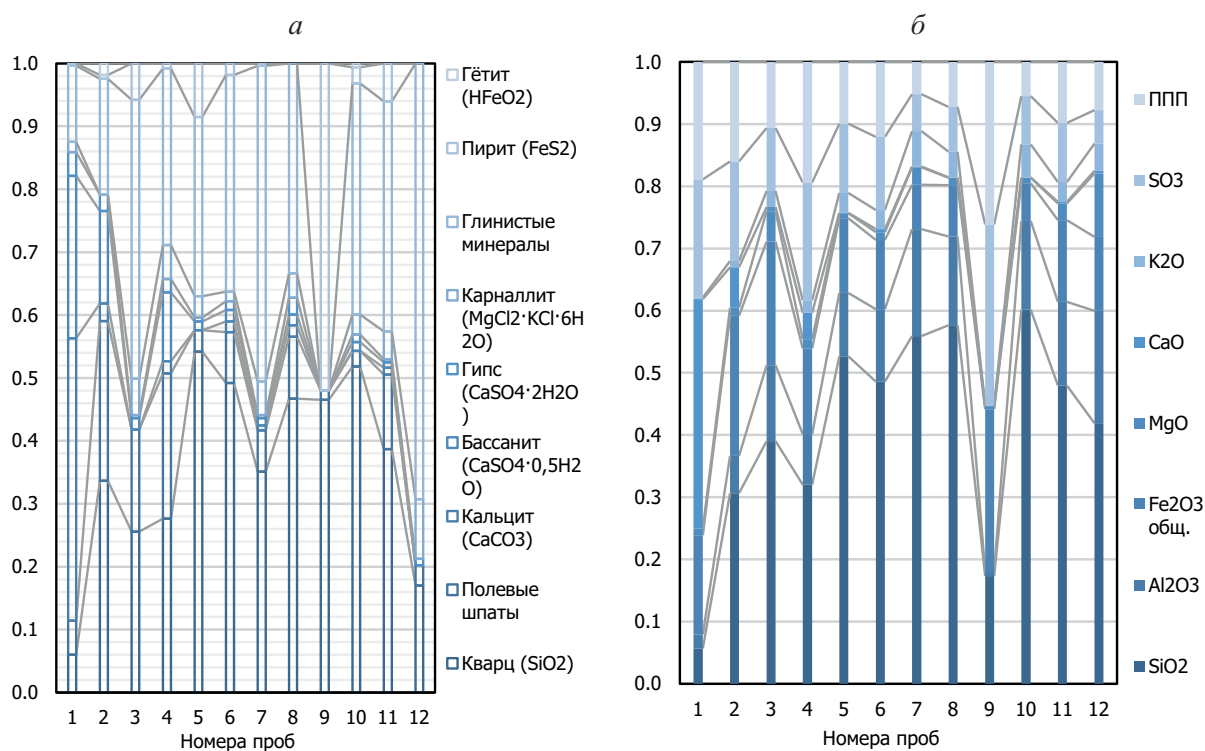


Рис. 4. Минеральный (а) и химический состав проб отвала (б), мас. доля.

Среди техногенных компонентов, отобранных из рыхлого материала отвала, можно выделить псевдоморфозы разного состава по древесине, охристые образования, шлаки.

С использованием масс-спектрального с индуктивно связанной плазмой анализа (ICP-MS) получены прецизионные данные по концентрациям 71 элемента в пробах из отвала. В отличие от рентгенофлуоресцентного анализа, этот метод характеризуется значительно более высокой чувствительностью (соответственно 1 и 0,0001 ppm), что позволяет определять содержания почти всех элементов таблицы Менделеева. В то же время навеска, используемая в этом анализе, существенно меньше (0,1 г), чем в рентгенофлуоресцентном (2 г). Отсюда сравнение данных этих анализов для более распространенных элементов иногда показывает большое расхождение, что объясняется указанной выше причиной, а также принципиально иным принципом определения содержаний. Среди микрокомпонентов в пробах отвала из токсичных элементов особенно заметны повышенные концентрации меди, цинка, мышьяка и в некоторых пробах – селена и ртути.

Для определения содержания легкорастворимых солей был применен метод масс-спектрального с индуктивно связанной плазмой анализа в водной вытяжке. В составе водной вытяжки прослеживается присутствие в повышенных количествах Cu, Zn, Co, As, Se. В отдельных пробах получены ураганные содержания селена, мышьяка, свинца и висмута (проба 4), урана и тория (проба 6).

По данным гранулометрического анализа ил из пруда-осветлителя представлен алевритоглинистыми (пробы 1, 2, 4 и 5) и глинисто-алевритовыми (3 и 6) частицами, размер которых обычно не превышает 100 мкм.

Минеральный состав проб ила из пруда-осветлителя Левихинского рудника представлен сульфатами (бассанит и гипс), массовая доля которых составляет от 64,6 до 71,7 % (Рис. 5а). Содержание оксидов и гидроксидов железа в пробах составляет от 12,1 до 20,0 %. Кроме того, во всех пробах содержатся карбонаты (кальцит 3,5-8,4 %), глинистые минералы (преимущественно гидрослюда 3,9-10,0 %) и хлорсодержащие соли (карналлит 1,7-3,5 %).

В химическом составе ила существенно преобладают оксиды железа и серы, что соответствует минеральному составу (Рис. 5б). Микрокомпонентный химический состав ила отличается повышенными содержаниями Cu, Zn, As, Cd, Pb.

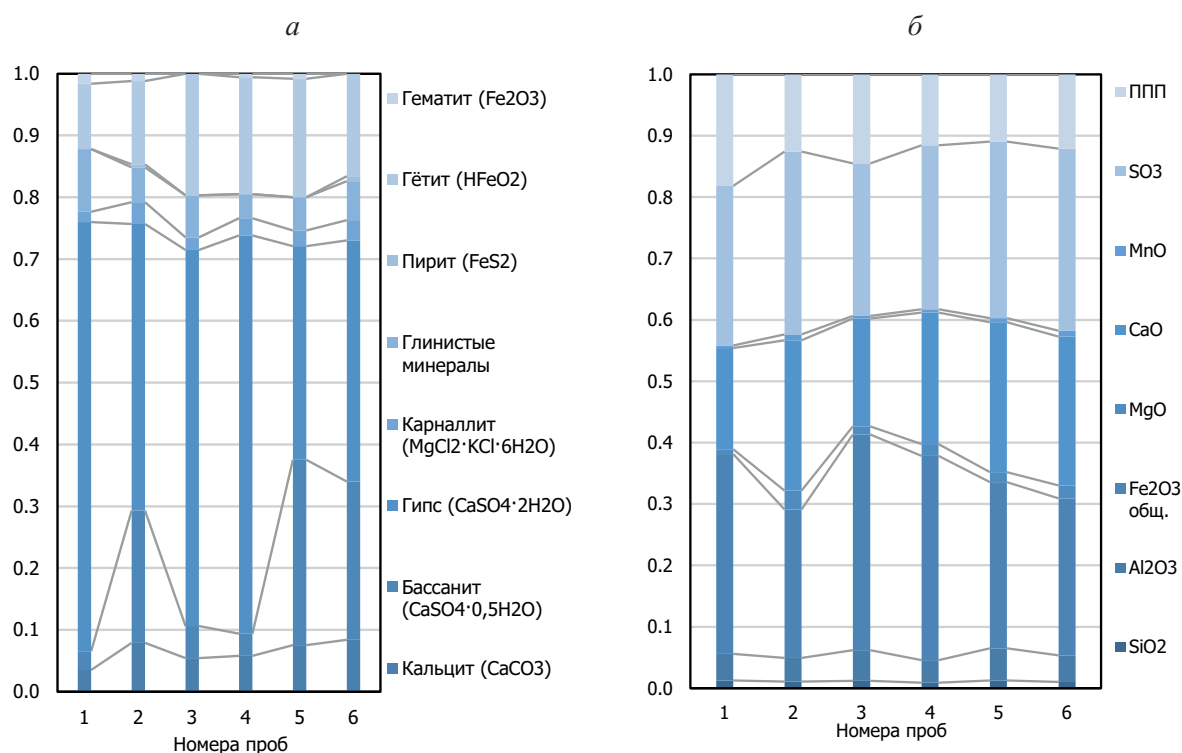


Рис. 5. Минеральный (а) и химический состав проб шлама пруда-осветлителя(б), мас. доля.

В составе водной вытяжки ила отмечены повышенные концентрации тех же элементов, что и в самом иле. Кроме того, встречаются ураганные концентрации никеля, иттрия, кадмия в пробе № 1.

Полученные результаты позволяют оценить состав техногенных отходов и будут использованы при разработке мероприятий по минимизации негативного влияния отработанного Левихинского омедноколчеданного месторождения на компоненты окружающей среды.

Исследования выполнены в рамках тем РАН 0405-2019-0005, 0328-2019-005 и гранта РФФИ № 20-45-660014.

Литература

1. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Левихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // *Геохимия*. – 2019. – Т.64. – №3. – С.282-299.

2. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Проблемы самореабилитации гидросферы и очистки шахтных вод на постэксплуатационном этапе (на примере Левихинского рудника, Средний Урал) // ГИАБ. 2020. №3.1. С. 501-503. DOI: 10.25018/0236—1493—2020—31-0-501-513.
3. Rybnikova L., Navolokina V. Analysis and Feasibility of Measures to Minimize the Impact of Acid Mine Waters Discharged by Abandoned Copper-Sulphide Mines on Hydrosphere of the Tagil River // E3S Web of Conferences. 177, 04009 (2020).
4. Nordstrom D.K. Baseline and premining geochemical characterization of mined sites // Applied Geochemistry. 2015. №57. P. 17–34.
5. Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 «Passive in-situ remediation of acidic mine / industrial drainage» (PIRAMID). University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle Upon Tyne UK.- 2003.- 166P.

МЕЗО-КАЙНОЗОЙСКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ ЗАУРАЛЬСКОГО ПЕНЕПЛЕНА КАК СРЕДА ЗАХОРОНЕНИЯ ОПАСНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Т.В. Суханова, Н.В. Макарова, А.Н. Стафеев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет.
Москва, 119899, Ленинские горы, д.1. E-mail: tanikamgu@mail.ru

В Восточном Зауралье сохранились фрагменты обширного пенеплена, формировавшегося после герцинской складчатости в течение мезозоя, а местами, где он не перекрывался морскими осадками, и в начале кайнозоя [1]. На его неровной поверхности с понижениями и выступами коренных пород образовалась кора выветривания (далее КВ). На ее состав и мощность влияли климатические условия, вещественный состав пород, степень их раздробленности тектоническими процессами, способствующими процессам выветривания. В результате коренные породы подверглись интенсивному разрушению на глубину от первых до нескольких десятков метров, особенно в местах, где они были тектонически ослаблены разломами. В результате неоднократно повторявшихся, хотя и слабых импульсов тектонических движений в течение мезозоя и раннего кайнозоя, некоторые участки пенеплена испытывали поднятия, и КВ с них частично смывалась, а иногда полностью. Верхние части коры выветривания перемывались и переоткладывались в процессе плоскостного смыва и более глубокого эрозийного расчленения. В результате почти повсеместно на ней развит делювий, который трудно отличить от собственно коры выветривания. Вследствие этого геологической съемкой она представлена в виде комплекса образований элюво-делювия мезозой-кайнозойского возраста (edMZ-KZ).

С начала новейшего этапа пенеПЛен был вовлечен в поднятие, наибольшая амплитуда которых в пределах Среднего Зауралья составляет 260-270 м и более. При этом многие новейшие поднятия наследовали выступы коренных пород, а впадины - понижения на поверхности пенеплена.

КВ имеет площадное и линейное распространение. Она заполняет неровности первичного рельефа коренных пород, отчего зависит ее мощность. При этом мощность увеличена в понижениях и уменьшена на выступах коренных пород. Увеличенная мощность КВ до 40-60, а иногда и до 100 м и более характерна для узких линейных зон дробления и трещиноватости пород по разрывам [2].

В большинстве случаев КВ выходит на поверхность и только местами перекрывается кайнозойскими отложениями. Поэтому верхняя граница коры, за редкими исключениями, совпадает с современной дневной поверхностью местности. В связи с этим гипсометрическое положение коры выветривания, ее строение и мощность являются показателями тектонических движений. Подошва коры выветривания не ровная, она понижается на участках повышенной трещиноватости, пересечения зон разломов, на контактах пород различного вещественного состава. В связи с этим она не всегда параллельна дневной поверхности или рельефу. Иногда она имеет наклон, противоположный поверхностному рельефу, в соответствии с наклоном коренных пород, на которых она развита. В этом случае гидроизогипсы подземных вод, приуроченные к коре выветривания и следующие по наклону ее подошвы, создают впечатление, что вода движется от более низких гипсометрических отметок к более высоким.

КВ на основании своего широкого распространения, особенностей строения, состава и значительной мощности может использоваться в качестве возможного вместилища различных опасных отходов. При этом большое значение для их сохранности, не распространения за пределы участков захоронения и недопущения загрязнения окружающей среды имеют состав коренных пород, на которых развита КВ, новейшие тектонические структуры, разрывные нарушения, а также современные геодинамические условия, в которых они развиваются.

Исследованный район расположен в северной части Челябинской области. В его геологическом строении принимают участие докембрийские, палеозойские, мезозойские и кайнозойские отложения. Из-за ограниченного развития палеоген-неогеновых отложений на поверхности развиты в основном докембрийские и палеозойские породы. В составе докембрийских (верхний протерозой, венд) пород высоко метаморфизованные амфиболитами, гнейсами, кварцитами. Палеозойские породы (силур, нижний девон) представлены метаморфическими сланцами, порфиритами андезито-

базальтового состава, туфами, туфопесчаниками и другими вулканогенными и вулканогенно осадочными породами, а также известняками нижнего карбона. Широкое развитие имеют палеозойские разломы, большая часть которых обновлена в новейшее время.

Независимо от состава пород кора выветривания имеет однотипное строение. В ее разрезах выделяются два горизонта, постепенно сменяющие друг друга. Нижний горизонт (1edMZ-KZ) – представляет собой разрушенные коренные породы, превращенные в щебнисто-дресвяные образования с включением отдельных более крупных обломков пород. Суглинистый заполнитель или отсутствует, или его содержание не значительное. Выше по разрезу нижняя часть коры выветривания постепенно сменяется верхним горизонтом - 2edMZ-KZ. Это подвергшаяся химическим изменениям материнская порода, часто сохраняющая ее структурные и текстурные особенности. В составе горизонта песчано-суглинистый материал с преобладанием глин – каолиновых, монтмориллонитовых гидрослюдистых - с редким включением щебня и дресвы. Цвет горизонта зависит от состава глин и коренных пород – красноватый на гранитах и светлый белесый на известняках. Соотношение мощностей горизонтов различно.

Анализ буровых данных и гидроизогипс, показывающих направление движения подземных вод, свидетельствует о том, что сток подземных вод, в том числе, загрязненных различными химическими отходами, происходит преимущественно в КВ, в различных ее горизонтах. Т.е., КВ является вместилищем грунтовых вод, а вместе с ними и опасных веществ. При наличии двух горизонтов КВ грунтовые воды обычно приурочены к нижнему более раздробленному и менее глинистому слою. Водоупором при этом служат не разрушенные коренные породы.

Помимо строения самой КВ имеют значение новейшие тектонические структуры, на которых она развита. Большая мощность КВ отмечается во впадинах, наследующих древние первичные понижения пенеплена, где изначально ее мощность больше, чем на поднятых участках. Поэтому впадины рассматриваются как основные вместилища опасных отходов. При этом для безопасного захоронения учитывается еще ряд условий, в частности, разрывная тектоника.

Несмотря на то, что вертикальные амплитуды по многочисленным разломам в исследованном районе незначительные (по данным бурения, первые метры), или фиксируются только горизонтальные деформации, разломы существенно влияют на распространение аномалий опасных химических веществ. При этом значение имеют тектонические геодинамические условия, в которых они находятся в настоящее время. В условиях сжатия разломы, являясь границами разных по составу пород, экранируют, т.е. служат барьерами на пути загрязненных грунтовых вод, препятствуют дальнейшему их продвижению и способствуют выклиниванию их на поверхности. С другой стороны, как зоны трещиноватости, они расширяют пятна загрязнения вдоль их простираения. С разломами, отражающими геодинамические условия растяжения, связано распространение основных аномалий в исследованном районе.

Помимо мезозойско-кайнозойской коры выветривания для захоронения опасных отходов потенциально могут использоваться и более молодые отложения – палеогеновые, неогеновые и четвертичные. С этой целью на территории исследованного района можно рассматривать наурзумскую свиту позднеолигоценового возраста, представленную озерными глинами и аллювиальными разнотерными песками с прослоями глин, гравием, галькой, щебнем коренных пород, являющихся продуктами разрушения коры выветривания. Мощность свиты до 30 м, заполняющая понижения в поверхности коренных пород, в частности, каменноугольных карбонатных,

Для захоронения различных отходов могут использоваться неогеновые или неоген-четвертичные отложения, слагающие древние конусы выноса. Один из таких конусов выноса сохранился южнее оз. Кызылташ. От основания новейшего поднятия с абс. высотой 260-270 м он спускается к югу к долине р. Мышеляк до абс. высоты 220 м. Отложения, слагающие конус выноса, представлены пролювиальными, делювиально-пролювиальными и аллювиально-пролювиальными отложениями. В их составе слоистые бурые суглинки и супеси, содержащие плохо окатанную гальку, гравий, линзы песка и глин, а также дресву из размытой коры выветривания. Грубость отложений уменьшается к периферической части конуса и увеличивается в присклоновых его частях. Также меняется и мощность отложений: в вершинной и присклоновых частях - 2-10 м, а в центральной и периферической частях она увеличена до 20-37 м. Увеличенная мощность и более тонкий состав в периферической части конуса объясняется подпруживающим влиянием растущего поднятия, при пересечении которого р. Мышеляк образует узкий antecedentный участок.

Буровые данные показывают, что подошва отложений неровная (рисунок).

Геологический разрез одного из участков в районе оз. Кызылташ

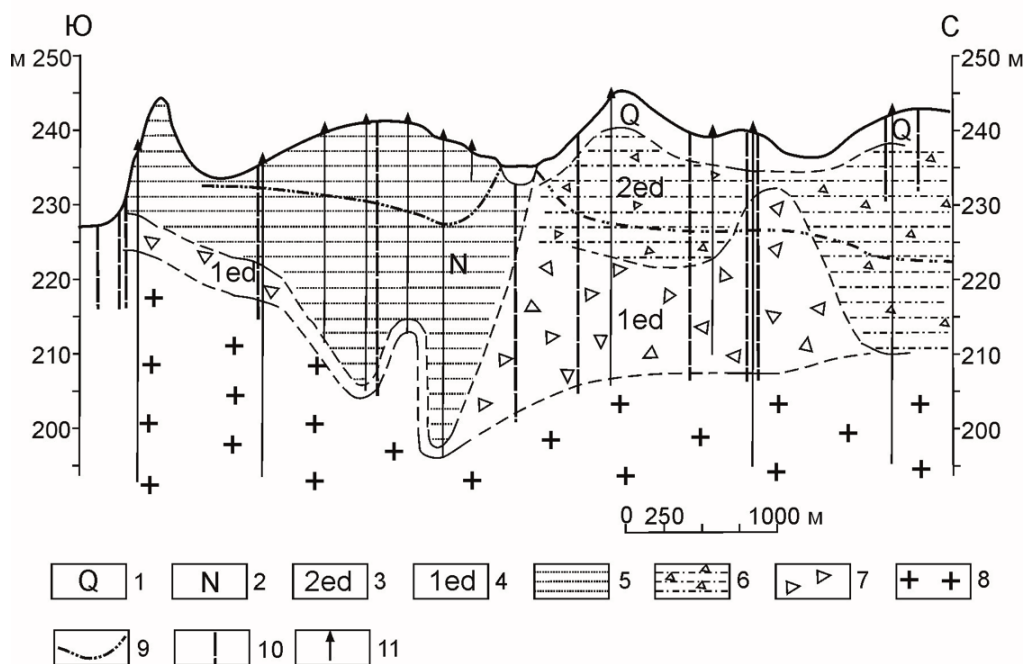


Рисунок. Геологическое строение одного из участков в районе оз. Кызылташ

Условные обозначения Разновозрастные отложения: 1 – четвертичные, 2 – неогеновые; горизонты коры выветривания: 3 – верхний, 4 – нижний; состав отложений: 5 – пески и суглинки; 6 – суглинки с дресвой; 7 – щебень и дресва; 8 – коренные породы; 9 – уровень грунтовых вод; 10 – разломы; 11 – скважины.

Выделяются понижения в коренных породах, которые имеют не только эрозионное происхождение. Неогеновые временные потоки размывли кору выветривания, оставив лишь незначительную часть нижнего горизонта КВ. Он выстилает понижения глубиной 10-15 м, которые, таким образом, являются древними первичными формами на поверхности пенеплена. Влияют также и нарушения разломами, по одному из которых амплитуда перемещения составляет около 6 м. В целом состав отложений, их значительная, но различная мощность, подчеркивающая крупные первичные понижения на поверхности коренных пород, используемые эрозией, возможно, еще и с тектоническими деформациями, – все это создает необходимые условия для изоляции химических отходов.

Значительные размеры конуса выноса (длина более 5 км, ширина 3-3,5 км) не позволяют связывать его образование с небольшим по высоте (260 м) поднятием, у основания которого он развит. Видимо, он образовался потоком, начинавшимся значительно севернее оз. Кызылташ, пересекавшим его котловину, когда озера еще не было, и затем поднятие, в пределах которого сохранились сквозные понижения на абс. высоте 40-50 м. или 20-30 м над озером. Одним из доказательств этого является присутствие в составе обломочного материала конуса выноса гнейсов венда, развитых только севернее впадины оз. Кызылташ.

Таким образом, благоприятными условиями для захоронения отходов являются новейшие впадины, наследующие первичные понижения рельефа пенеплена, в которых КВ имеет значительную мощность.

Литература

1. 1. Карта поверхностей выравнивания и кор выветривания СССР м-ба 1: 2 500 000. 1972.
2. 2. Рыцев А.М., Фаткуллин Р.А., Абдрахманов Р.Ф. Мезо-кайнозойские коры выветривания Южного Урала. Информац. материалы межведомст. совещ. Свердловск. 1966. Сб. № 8.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗОНАХ

Е.С. Ушакова, Т.И. Караваева

Естественнонаучный институт
Пермского государственного национального исследовательского университета,
614990, г. Пермь, ул. Генкеля, 4. E-mail: ushakova.evgeniya@gmail.com

Введение

Почвы промышленных территорий, а также вблизи объектов транспортной инфраструктуры характеризуются значительными концентрациями тяжелых металлов. Согласно ежегодным докладам и проведенным исследованиям в почвах промышленности и автотранспорта российских городов за последнюю четверть века зафиксированы повышенные концентрации Hg, Zn, Sn, Mn [2, 4]. При этом наблюдается увеличение контрастности техногенных геохимических аномалий (Cu, Mo, As, Co и Cd) рядом с промышленными предприятиями, автомобильными и железными дорогами [4, 6, 12]. Очаги геохимической нагрузки часто обусловлены осаждением в почвенном субстрате остаточных ингредиентов-микропримесей, содержащихся в нефти: V, Ni, Co, Hg, As, Cd и др. [8, 9, 11]. При этом современные городские территории характеризуются достаточно большой мощностью насыпных грунтов различного генезиса. Инженерно-геологические условия территорий промышленных узлов преимущественно характеризуются наличием в геологическом разрезе слоя современных техногенных образований в среднем мощностью до 10 м, характеризующиеся неоднородностью состава, строения и свойств [1, 3]. Согласно межгосударственному стандарту ГОСТ 25100-2020 грунт – это любая горная порода, почва, осадок и техногенные минеральные образования, рассматриваемые как многокомпонентные динамические системы и часть геологической среды, участвующие в инженерно-хозяйственной деятельности. При этом при рассмотрении техногенных поверхностных образований в пределах промышленных зон могут быть встречены следующие группы квазиземы, натурфабрикаты, артификабрикаты и токсифабрикаты согласно классификации почв. Во всех Европейских нормативных актах почвы и грунты рассматривают в тандеме с целью оценки степени воздействия на человека от присутствующих в почве и грунте опасных загрязняющих веществ, которые зависят от функционального использования земельного участка, концентрации загрязнения в почвах и грунтах и степени риска загрязнения для других компонентов среды (грунтовые воды и воздух) [13]. -

Функциональное зонирование городских территорий приведены в Генеральном плане каждого населенного пункта, как правило, с ярко выраженной промышленно-производственной специализацией. При промышленном зонировании территорий выделяют производственные зоны, коммунальные и зоны инженерной и транспортной инфраструктуры. При этом каждая из этих зон характеризуется приоритетными элементами с высоким уровнем загрязнения.

По данным многолетнего мониторинга почвы населенных пунктов, расположенных вблизи предприятий черной и цветной металлургии демонстрируют наибольшую категорию загрязнения от умеренно опасной до опасной. Результаты наблюдений почв предприятий с 2010 по 2019 показали опасную категорию в г. Свирск (УМН-1) и демонстрируют превышение ПДК по Pb, Cu, Zn, Cd; почвы в одно километровой зоне от ОАО «СУМЗ» г. Ревда – Cu, Pb, Cd, Cr, Zn и Кировоград – Zn, Pb, Cu, Cd и Реж – Ni, Cd, Cr, Co; Владикавказ – Cd, Pb, Cu, Zn, Hg; Норильск – Cu, Ni, Co [2].

Целью работы является геохимическая оценка загрязнения почв промышленных территорий и обоснование к дальнейшему использованию. В задачи исследований входила оценка состояния почв транспортных и инженерных зон промышленных территорий в пределах санитарно-защитных зон двух крупных химических предприятий Пермского края и анализ утилизации, ремедиации загрязненных участков неорганическими и органическими соединениями.

Описание объектов исследования

Город Березники расположен в северной части Пермского края и является крупным промышленным центром. Промышленная зона располагается в левобережной части бассейна р. Камы (Рис. 1).



Рис. 1. Расположение точек опробования в промзоне г. Березники (Пермский край).

В настоящее время в пределах промзоны города расположены крупные предприятия: филиал «Азот» АО «ОХК «Уралхим», АО «Березниковский содовый завод», Березниковская ТЭЦ, ОАО «Сода-Хлорат». Территория пересечена сетью автомобильных и железных дорог, необходимых для функционирования предприятий, практически вся площадь спланирована и покрыта твердой водонепроницаемой поверхностью (промышленная зона, асфальтированные дороги и проезды, производственные здания и территории). Верхняя часть геологического разреза территории неоднородна по площади и разрезу и представлена техногенными, аллювиальными, аллювиально-биогенными и биогенными отложениями четвертичной системы различного литологического состава – глинами, суглинками, песками мелкими и средними, торфом. Объектом исследования являются почвы инженерной и транспортной зон промышленных территорий г. Березники. На исследованной территории почвы представлены урбостратоземами супесчаного и песчаного состава, имеют выраженные признаки деградации: почвенный покров уплотнен, полноценная субстанция отсутствует, присутствуют включения строительного мусора, мелкие камни, осколки стекла.

Методика исследования

Учитывая преимущественную аккумуляцию загрязняющих веществ в приповерхностном слое, отбор проб почв осуществлялся с глубины 0–20 см методом комплексной пробы на реперных участках в пределах промышленной и санитарно-защитной зон промышленных предприятий г. Березники в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа». Оценка загрязненности почв выполнена с использованием российских гигиенических нормативов (ПДК – согласно СанПиН 1.2.3685-21) по стандартным 7 элементам (Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, As, Hg), бенз(а)пирену и микроэлементам (Li, Be, Cr, Co, Se, Rb, Sr, Mo, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, W).

Оценка уровня химического загрязнения почв как индикатора неблагоприятного воздействия на здоровье населения также проведена с использованием суммарного показателя химического загрязнения Z_c , который рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_c = K_{c1} + \dots + K_{ci} + \dots + K_{cn} - (n - 1), \quad (1)$$

При этом K_c (коэффициент концентрации химического вещества) определяется отношением фактического содержания определяемого вещества в почве (C_i) в мг/кг почвы к фоновому содержанию ($C_{iф}$). В качестве фоновых значений для расчета коэффициентов концентраций использованы значения содержания элементов в пробах почв супесчаного состава, отобранных на условно-фоновой территории без антропогенного влияния.

Результаты исследования

Водная вытяжка почв характеризуется разнофациальным составом: гидрокарбонатно-кальциевый и гидрокарбонатно-натриевый, сульфатно-кальциевый, нитратно-кальциевый и нитратно-натриевый. Почвы в интервале опробования Т1–Т4 представлены супесью с $pH_{\text{сол}}$ от 5,8 до 7,1; в интервале опробования Т5–Т10 – песками с $pH_{\text{сол}}$ от 6,6 до 8,0.

При оценке загрязнения почв загрязняющими веществами анализировалось валовое содержание элементов с учетом кислотности среды и литологического состава субстрата. Превышение относительно ПДК выявлено для всех участков опробования по мышьяку (за исключением Т1), отмечены разовые превышения по ртути, цинку, никелю и меди (Рис. 2).

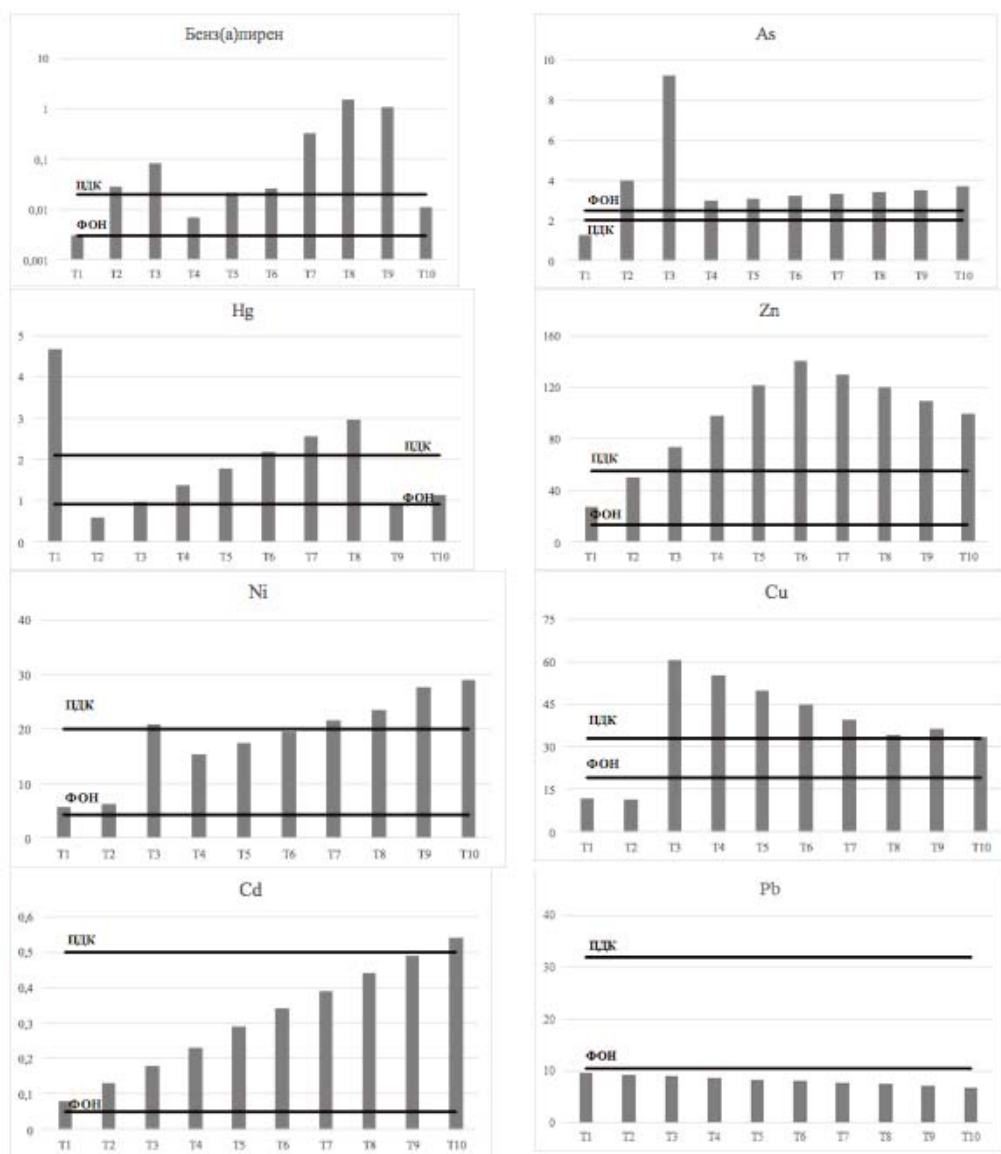


Рис. 2. Сравнительный анализ превышений относительно ПДК и фона загрязняющими веществами почвы промышленных территорий (мг/кг).

Кратность превышений над ПДК по содержанию мышьяка достигает 4,6 раза; по ртути – 2,2; по цинку – 2,5; по никелю – 1,4; по меди – 1,8 раза. Особое внимание необходимо уделить повсеместное загрязнение почв бенз(а)пиреном, превышения содержания которого над ПДК достигают 75 раз. Согласно СанПиН 1.2.3685-21 установлена «чрезвычайно опасная» категория загрязнения исследуемых почв органическим соединением I класса опасности на основании превышения допустимого уровня по максимальному из показателей вредности – K_{max} (МУ 2.1.7.730-99). Категория загрязнения исследуемых почв неорганическими соединениями I и II классов опасности согласно СанПиН 1.2.3685-21 установлена «опасная». Почвы на всей территории имеют ограничения по использованию при проведении земляных работ и требуют перекрытия слоем чистого грунта. Такие мероприятия в условиях постоянной геохимической нагрузки на промышленных территориях, которые даже в самой отдаленной перспективе не будут использоваться в сельском хозяйстве, не всегда целесообразны и, как правило, приводят к увеличению объемов загрязненных почв на данных территориях.

При использовании фонового подхода для геохимической оценки распределения тяжелых металлов и микроэлементов в почвах промышленной территории выявлен высокий уровень их загрязнения широким спектром элементов (табл. 1). В большинстве точек опробования наибольшие превышения относительно фоновых значений зафиксированы по содержанию Zn и Cd.

<i>Таблица 1.</i>	
Распределение тяжелых металлов и микроэлементов в почвах с использованием фонового подхода	
	Геохимическая ассоциация
T1	Mo10.8, Co7.1, Hg5.1, Cr4.8, Te4.4, Sr 4.1, W3.9, Sn3.7, Sb3.5, Li3.0, Ba2.4, Be2.2, Zn2.1, Rb1.7, Cs1.9, Cd1.6, Ni1.3
T2	Sn4.9, Cr4.4, Sr4.4, Li3.9, W3.9, Zn3.8, Sb3.5, Cd2.6, Be2.0, Co3.2, Mo2.9, Ba1.7, As1.6, Ni1.4, Rb1.1
T3	Zn5.7, Ni4.9, Sr4.8, Cr4.7, Te4.4, Co3.9, As3.7, Cd3.6, W3.2, Cu3.2, Sn3.0, Li2.4, Cs2.0, Be1.9, Sb1.9, Rb1.8, Mo1.3, Ba1.3, Hg1.1
T4	Zn7.5, Cd4.6, Co4.5, Sr4.4, Cr4.0, Ni3.6, Te3.5, W3.3, Cu2.9, Sn2.8, Li2.6, Rb2.2, Cs2.1, Be2.0, Sb1.8, Ba1.6, Hg1.5, As1.2, Mo1.1
T5	Zn9.4, Cd5.8, Sr5.5, Co4.5, Ni4.1, Cr4.0, Sn3.2, Te3.0, W3.0, Cu2.6, Li2.3, Cs2.2, Rb1.8, Sb1.8, Ba1.4, Mo1.3, As1.2, Se1.0
T6	Zn10.1, Cd6.8, Sr5.2, Cr4.7, Ni4.5, W4.2, Co4.1, Sn4.0, Sb3.2, Te3.1, Cs2.5, Li2.4, Cu2.4, Hg2.4, Rb2.1, Be2.0, Mo1.8, Ba1.5, As1.3
T7	Zn10.1, Cd7.8, Cr5.2, Ni5.0, Co4.5, Sr4.0, W3.6, Sn 3.4, Li3.2, Hg2.8, Be2.7, Te2.6, Sb2.4, Rb2.3, Cs2.2, Cu2.1, Ba1.9, Mo1.3, As1.3, Se1.1
T8	Zn9.3, Cd8.8, Ni5.5, Sr4.3, Hg3.3, Rb2.4, Te2.6, Cs2.1, Cu1.8, Sn1.8, W1.7, Ba1.6, Sb1.6, Li1.4, Cr1.4, As1.4, Co1.2, Se1.1, Be1.0
T9	Zn8.5, Cd9.8, Ni6.4, Te2.7, Cr2.1, Sn2.1, Cs2.1, W2., Cu1.9, Rb1.7, Se1.5, As1.4, Li1.4, Mo1.2, Sb1.2, Be1.0, Hg1.0
T10	Cd10.8, Zn7.7, Ni6.7, Sr5.4, Rb2.3, Te2.2, Cs1.8, Cu1.8, W1.7, Cr1.7, Co1.7, Ba1.6, As1.5, Li1.4, Sn1.4, Sb1.3, Se1.2, Hg1.2, Be1.0

Согласно полученным результатам, диапазон значений показателя Z_c , рассчитанного с учетом загрязнения неорганическими и органическими соединениями, для почв промышленной территории г. Березники изменяется от 515 (Т8) до 16 (Т10), что соответствует категории загрязнения от «чрезвычайно опасной» до «умеренно опасной». На наиболее загрязненных участках Т8, Т9 и Т7 основной вклад (от 80% до 98%) в формирование индекса Z_c вносит бенз(а)пирен.

При расчете суммарного показателя Z_c с учетом использования стандартного перечня тяжелых металлов и мышьяка категория загрязнения соответствует «допустимой» только в Т1 и Т2, а в остальных точках опробования – «умеренно опасной» категорией загрязнения.

Таблица 2.

Оценка степени химического загрязнения почв

№	Zc	Категория загрязнения	Кратность превышения ПДК	Категория загрязнения	Рекомендации по использованию*
T1	44.5	Опасная	Hg(2.2)	Опасная	Использование в ходе строительных работ под отсыпки котлованов и выемок, на участках озеленения с подсыпкой слоя чистого грунта не менее 0,2 м, использование под технические культуры.
T2	35.2	Опасная	As(2.0), бенз(а)пирен (1.4)	Опасная	
T3	54.0	Опасная	As(4.6), бенз(а)пирен (4.1), Cu(1.8), Zn(1.3), Ni(1.1)	Опасная	
T4	26.3	Умеренно опасная	Zn (1.8), Cu(1.7), As(1.5)	Опасная	
T5	30.9	Умеренно опасная	Zn (2.2), As(1.6), Cu(1.5), бенз(а)пирен (1.1)	Опасная	
T6	37.5	Опасная	Zn(2.6), As(1.6), Cu(1.4), бенз(а)пирен (1.3), Hg(1.0)	Опасная	
T10	16.2	Умеренно опасная	As(1.9), Zn(1.8), Ni(1.5), Cd(1.1), Cu(1.0)	Опасная	
T7	137.8	Чрезвычайно опасная	бенз(а)пирен (16.5), Zn(2.4), As(1.7), Hg(1.2), Cu(1.2), Ni(1.1)	Чрезвычайно опасная	Вывоз и утилизация на специализированных полигонах.
T8	515.6	Чрезвычайно опасная	бенз(а)пирен (75.5), Zn(2.2), As(1.7), Hg(1.4), Ni(1.2), Cu(1.0)	Чрезвычайно опасная	
T9	371.3	Чрезвычайно опасная	бенз(а)пирен (54.5), Zn(2.0), As(1.8), Ni(1.4), Cu(1.1)	Чрезвычайно опасная	
*Согласно СанПиН 2.1.3684-21					

Обсуждение

Длительная высокая техногенная нагрузка в пределах промышленной зоны г. Береники привела к значительной трансформации химического состава почв, выражающейся в экстремальном загрязнении в пределах объектов транспортной и инженерной инфраструктуры, на основании оценки загрязнения почв селитебных территорий. В случае реализации проектных мероприятий по реконструкции или новому строительству в пределах транспортной и инженерной инфраструктуры промзоны г. Береники обнаруженные почвы на участке T7-T9 подлежат вывозу и утилизации на специализированных полигонах.

Очистка почв, загрязненных неорганическими и органическими соединениями, традиционно осуществляют с применением земляных работ – снятие пластов загрязненной почвы (экскавация) с дальнейшим размещением в местах складирования и утилизации ближайших ТКО. Однако вывоз и захоронение загрязненных почв полностью противоречит рациональному природопользованию. Поскольку в последние десятилетия во всем мире ведутся работы по ремедиации загрязненных почв и грунтов с целью вторичного использования. Данное направление позволит снизить нагрузку на действующие полигоны ТКО.

Во всем мире в течение многих лет осуществляется интенсивная разработка способов и технологий по удалению загрязнений или детоксикации почв: физическая ремедиация (например, промывка, термическая десорбция, солидификация), химическая ремедиация (например, адсорбция, катализ, осаждение, электрокинетические методы), биологическая ремедиация (например, биодegradация, фиторемедиация, биовентирование) и комбинированная ремедиация (например, электрокинетико-микробное восстановление; промывка-микробная деградация) [5, 14]. Кроме того, технологии ремедиации классифицируются по категориям *exsitu* и *insitu* [10]. Некоторые из них хорошо известны и используются в больших масштабах, в то время как другие все еще находятся на уровне исследований. Основными факторами оценки при выборе являются геология загрязненного участка,

характеристики загрязнения, стоимость, осуществимость и устойчивость применяемого процесса, а также уровень готовности технологии [14].

В настоящее время наиболее разработаны методы извлечения тяжелых металлов из промышленных и бытовых сточных вод, а также их осадков. Они включают мембранные технологии, обратный осмос, электрохимические методы, цементирование, адсорбцию активированным углем и твердыми отходами (опилки, кора, пенокерамика и текстильные глины), испарение, разбавление, использование ионообменных смол, а также отмывание ТМ синтетическими сурфактантами [7].

Универсального метода очистки почв от тяжелых металлов и бенз(а)пирена не существует, поскольку эффективность метода зависит от типа и свойств почвы, степени адаптации произрастающих на ней растений и целого ряда других факторов. Выбор конкретной технологии для обработки загрязненного участка зависит от химической структуры загрязняющих примесей и других характеристик. Несмотря на то, что в пределах Пермского края большую часть территории занимают дерново-подзолистые почвы разного гранулометрического состава, то выбор ремедиации загрязненных почв промышленных территорий потребует дополнительных исследований, поскольку являются антропогенно глубоко преобразованными почвами с отличными механическими и химическими преобразованиями.

Заключение

В почвах транспортной и инженерной инфраструктуры промышленной территории г. Березники были обнаружены превышения, как фоновых значений, так и ПДК большинства загрязняющих веществ. В точках опробования Т7-Т9 выявлены участки с категорией загрязнения как чрезвычайно опасные. Согласно рекомендации по использованию, почвы с данных участков подлежат вывозу и утилизации. С целью снижения нагрузки на полигоны ТКО, необходимо проработать вопрос по созданию полигонов по складированию опасных отходов с возможностью ремедиации загрязненных почв и грунтов, а также донных осадков с последующим вторичным использованием очищенных почв. Большое количество рекультивационных работ на месте в Европе позволяет предположить, что данное направление в России станет перспективным в области рационального природопользования. С целью минимизации негативного воздействия на здоровье населения необходим мониторинг загрязненности почв селитебных территорий и своевременная ремедиация загрязненных участков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования проект № 2019-0858

Литература

1. Воронцов Е.А., Шульгин П.Ю. Особенности инженерно-геологического обоснования реконструкции промышленных зон на городских территориях (на примере города Москвы) // *Евразийское научное объединение*. 2015. № 2(7). с. 168-170.
2. Ежегодник. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2019 году. – Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун». 2020. 129 с.
3. Жаркова Н.И., Черныйчук Г.А., Жарков И.Я., Галеев Р.К. Техногенные грунты г. Казани: особенности формирования, состава, строения и свойств // *Ученые записки Казанского университета. Естественные науки*. 2013. № 155(4). с.130-143.
4. Касимов Н.С., Власов Д.В. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах российских городов (по данным ежегодных докладов Росгидромета) // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2018. № 3. с. 14-22.
5. Копчик Г.Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // *Почвоведение*. 2014. № 7. с. 851-868.
6. Корляков И.Д., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Тяжелые металлы и металлоиды в почвенном покрове г. Улан-Удэ // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2019. № 3. с. 120–137.
7. Костина Л.В., Куюкина М.С., Ившина И.Б. Методы очистки загрязненных тяжелыми металлами почв с использованием (био)сурфактантов (обзор) // *Вестник Пермского университета. Серия Биология*. 2009. №10(36). с.95-110.

8. *Меньшикова Е.А., Караваева Т.И. Особенности оценки состояния грунтов в практике инженерно-экологических изысканий // Инженерные изыскания. 2019. № 4. с. 16–23.*
9. *Радомская В.И., Бородина Н.А. Оценка антропогенного загрязнения почвы урбанизированной территории на примере города Благовещенска // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2019. №6. с.79-93.*
10. *Смагин А.В., Шоба С.А., Макаров О.А. Экологическая оценка почвенных ресурсов и технологии их воспроизводства (на примере г. Москвы). М., Изд-во Моск. Ун-та, 2008, 360 с.*
11. *Ушакова Е.С., Караваева Т.И., Белкин П.А. Экологическое состояние почв промышленных территорий (на примере г. Березники, Пермский край): сравнение отечественных и зарубежных методов оценки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 10. С. 58-70.*
12. *Хасанова Р.Ф., Суяндукоев Я.Т., Семенова И.Н., Рафикова Ю.С., Серегина Ю.Ю. Экологическая опасность загрязнения почв урбанизированных территорий горнорудного региона // Гигиена и санитария. 2019. № 98(12). С. 1370-1375.*
13. *Danish Environmental Protection Agency 2002. Ecological risk assessment of contaminated sites. Environmental project. No. 1422, 2012, Vejledning fra Miljø-styrelsen. URL:<https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2012/05/978-87-92903-12-9.pdf> (дата обращения: 14.11.2021).*
14. *Raffa, C.M.; Chiampo, F.; Shanthakumar, S. Remediation of Metal/Metalloid-Polluted Soils: A Short Review // Applied Science. 2021. 11. 4134.*

ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ГРУНТОВ ПРАВОБЕРЕЖНОЙ ЧАСТИ г. ДУБНА

Н.А. Федорук

Государственный университет «Дубна», 141981, г. Дубна, ул. Школьная д.10.
E-mail: fedoruk_dubna@mail.ru

Согласно ГОСТ 25100-2020, грунт – это «любая горная порода, почва, осадок и техногенные минеральные образования, ... изучаемые в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью» [5]. Исследование загрязнения почв на урбанизированных территориях, подверженных интенсивному воздействию хозяйственной деятельности, весьма актуально.

Химические элементы, которые поступают в атмосферу с выбросами автотранспорта и промышленных предприятий, могут накапливаться в почве, обуславливая ее значительное загрязнение. Существенная роль в загрязнении почв принадлежит снежному покрову, который депонирует атмосферные выпадения, а при таянии может загрязнять как почву, так и грунтовые воды.

Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха в малых и средних городах являются промышленные предприятия различного спектра, но преобладающим источником сегодня можно отметить автотранспорт [1].

Снег является твердыми атмосферными осадками и накапливает загрязняющие вещества в два этапа: при выпадении и нахождении на поверхности [2]. Почвы также являются важным индикатором геоэкологической обстановки, поскольку находятся на пересечении всех транспортных путей миграции химических элементов и являются депонирующей средой. Вследствие постоянной антропогенной нагрузки самый верхний почвенный горизонт несет основную информацию о загрязнении [6]. К одним из наиболее опасных загрязняющих веществ относятся тяжелые металлы.

Цель работы – выявить концентрации тяжелых металлов в снежном и почвенном покрове.

Задачи:

- Провести пробоотбор по намеченной сети наблюдения;
- Осуществить лабораторный анализ проб;
- Сделать выводы о концентрациях тяжелых металлов.

Территорией исследования является наукоград Дубна, расположенный на самом севере Московской области. Численность населения по состоянию на 2021 г. составляет 74 499 человек. Площадь территории города – 63,36 км². Городской застройкой занято примерно четверть территории населенного пункта, остальное – природные зоны [9].

Город расположен в пределах Русской плиты. Это устойчивый элемент, представленный породами каменноугольного, юрского периодов, а также мощной толщей четвертичных отложений, представленными, в основном, ледниковыми образованиями [6].

Наукоград располагается на юге блюдцеобразной структуры – Московской синеклизы. Дубна расположена на южной оконечности Верхневолжской плоской низменности, расчлененность территории незначительна и размах рельефа не превышает 3 м. Уплощенный характер территории способствует существенному заболачиванию естественных понижений в рельефе [6].

Климат Дубны характеризуется как умеренно-континентальный с преобладанием воздушных масс умеренных широт. Для территории Дубны характерно непостоянство погоды с резкой сменой. Зима холодная и довольно продолжительная, с оттепелями. Лето теплое, со сменой погоды на дождливую и прохладную. Существенное влияние на климат городского округа оказывают большое количество водоемов, а также лесные массивы, все эти факторы воздействуют не только на температуру, но и на влажность, распределение осадков, ветровой режим [9].

В течение года заметно меняется среднемесячная температура. Самый холодный месяц – январь, а самый теплый месяц – июль. Среднегодовая температура в городе составляет плюс 3,5°С. В последние годы все чаще наблюдается теплая зима, в связи с чем возникают проблемы с формированием постоянного снежного покрова [6].

Влажность на территории Дубны меняется в широких пределах. Сам город относится к зоне повышенного увлажнения, среднегодовая сумма осадков равняется 783 мм. Максимальных значений влажность достигает в зимние месяцы [8].

Преобладающим направлением ветра на территории городского округа является юго-западное. Данное направление преобладает в зимнее время года, а летом характерны ветра северного направления. Средняя скорость ветра в Дубне – 3,3 м/с [9].

Наукоград Дубна – единственный в Московской области город, расположенный на р. Волге, которая делит город на две части. Ширина Волги в пределах города составляет в среднем 300 м, а глубина – 7 м. Реки окрестностей Дубны принадлежат к восточно-европейскому типу водного режима. Талые снеговые воды являются основным источником их питания, однако у самой Волги питание смешанное, осуществляется за счет осадков различной фазы, а также подземных вод [6].

На территории Дубны уровень грунтовых вод составляет около 1 м, часто увеличивается в связи с паводками до 0,6 м, с последующим подтоплением городских территорий. Это обусловлено тем, что город со всех сторон ограничен водными объектами – р. Волгой, Дубной, Сестрой и каналом им. Москвы [6].

На гидрогеологический и гидрологический режимы территории значительное влияние оказывает система верхневолжских водохранилищ. Местное заболачивание и подтопление территорий вызывается строительством дорог в результате нарушения естественного дренажа [6].

Почвенный покров города и его окрестностей типичен для северной части Московской области и характеризуется большой пестротой по степени оподзоленности, развитию дернового процесса и прочих факторов.

На территории Дубны наиболее распространены дерново-подзолистые почвы разной степени оподзоленности. На болотах встречаются торфянистые и торфяно-подзолистые почвы. В поймах рек распространены дерновые и дерново-луговые почвы. Почвы с признаком оглеения можно встретить на менее дренируемых участках [6].

Естественный почвенный покров на территории города сильно изменен и сохранился только в лесопарковых зонах. Урбаноземы, городские почвы Дубны, формируются на насыпных грунтах и обладают своими особыми свойствами. Для них характерен поверхностный органоминеральный насыпной, перемешанный горизонт с урбаногенными включениями, понимаемый как особое природно-антропогенное образование [9].

Отбор исследуемых грунтов для последующего анализа проходил в два этапа: зимой и весной снежный покров, летом – почва.

Отбор почвенных проб осуществлялся в соответствии со следующими нормативными документами [3, 4, 8].

Пробы почвы отбирались в августе 2021 г. в солнечную погоду из верхнего горизонта. В черте города глубина пробоотбора составляла максимум 10 см. Из 5 точечных проб, методом «конверта» составлялась одна, массой около 1 кг, после чего образцы транспортировались в лабораторию.

Исследование снежного покрова проводилось в январе, феврале, марте 2019 и 2020 гг. Отбор проб снежного покрова проводился согласно действующим нормативно-методическим документам [7,10].

Снег отбирался во всех точках в течение суток, чтобы избежать выпадения осадков, которые снизили бы достоверность результатов. Отбор проб проводился в январе, феврале и марте, на всю толщину снежного покрова чистой пластиковой трубкой, в местах, где снежный покров не был поврежден и имел равномерную мощность. Отбиралась сборная проба для одной точки в заранее промытые и просушенные пластиковые ведра объемом 5 л, что при таянии дало не менее 2 л талой снеговой воды. Ведра с пробами маркировались, после чего доставлялись в лабораторию и растапливались при комнатной температуре. После чего осуществлялся лабораторный анализ.

Точки пробоотбора грунтов, как почвенного, так и снежного покрова совпадают и наносились на карту с помощью программы SASPlanet (Рис. 1).

При проведении лабораторного анализа использовались поверенные и откалиброванные приборы. Для выявления концентраций тяжелых металлов в жидкой фазе снежного покрова и почвенной вытяжке был применен атомно-абсорбционный спектрометр «Квант-2А». Почвенная вытяжка готовилась с помощью микроволновой системы пробоподготовки МС-6 с использованием стандартных методик.



Рис. 1. Точки пробоотбора почвы и снежного покрова на территории правого берега г. Дубна.

Для обработки результатов использовался программный комплекс Microsoft Excel. Для каждой среды было рассмотрено 5 тяжелых металлов: кадмий (Cd), медь (Cu), никель (Ni), свинец (Pb), цинк (Zn).

В качестве фоновой точки для обеих сред выбрана точка №5. Данная точка расположена в одном из крупнейших лесных массивов правого берега г. Дубна, подвержена минимальной антропогенной нагрузке, обильная растительность задерживает воздушный перенос загрязнителей в т.ч. тяжелых металлов. В предыдущих исследованиях, посвященных экологической оценке состояния почвенного и снежного покрова города, авторы в качестве фона выбирали район Ратмино, расположенный на окраине города и лишенный промышленных объектов [6]. Однако в последние годы данный район застраивается коттеджными объектами и другой инфраструктурой, берега рек Волга и Дубна на территории Ратмино используются населением в качестве рекреационной зоны, что негативно сказывается на геохимическом балансе.

Усредненные показатели содержания тяжелых металлов в исследуемых средах за все периоды наблюдений рассмотрены ниже в таблицах.

Таким образом, анализ данных показал, что содержание в снежном покрове кадмия и никеля не превышают ПДК(рх). Данный параметр был выбран не случайно, на сегодняшний день для снежного покрова не существует предельно допустимых концентраций, а водоемы исследуемой области имеют статус рыбохозяйственного назначения.

Что касается концентрации меди, то превышения почти в 6 раз можно обнаружить в точке № 1, а также серьезные показания в точке № 8, которая расположена в промышленной зоне города. Свинец превышает предельно допустимые концентрации в точке № 2, которая соответствует еще одной промышленной зоне, и в точке № 7 внутри жилого двора, неподалеку от стоянки автомобильного транспорта. Цинк превышает ПДК(рх) во всех точках исследования.

<i>Таблица 1.</i>					
Среднее значения тяжелых металлов в снежном покрове правого берега г. Дубна					
Точка №	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
	ср. знач. мг/л				
1	0,0002	0,0059	0,0014	0,0012	0,0357
2	0,0001	0,0013	0,0004	0,0023	0,0389
3	0,0002	0,0010	0,0007	0,0008	0,0249
4	0,0001	0,0013	0,0006	0,0007	0,0287
5 (фон)	0,0002	0,0015	0,0007	0,0006	0,0538
6	0,0002	0,0008	0,0005	0,0007	0,0217
7	0,0001	0,0010	0,0003	0,0020	0,0294
8	0,0002	0,0027	0,0007	0,0013	0,0408
9	0,0003	0,0024	0,0001	0,0014	0,0174
ПДК(рх)	0,0010	0,0010	0,1000	0,0020	0,0100

В фоновой точке №5 лесного массива наблюдаются максимальные показатели по цинку, однако по концентрациям кадмия, меди, никеля и свинца ситуация близка к остальным точкам, местами фон показывает меньшие значения.

Рассмотрим концентрации тяжелых металлов в почвенных вытяжках, представленных в табл. 2.

<i>Таблица 2.</i>					
Среднее значения тяжелых металлов в почвенном покрове правого берега г. Дубна					
Точка №	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
	ср. знач. мг/кг				
1	0,3	10,5	14,5	6,8	14,5
2	0,1	11,9	10,5	8,6	10,7
3	0,1	20,8	25,0	7,4	26,5
4	0,1	7,0	7,6	3,7	8,5
5 (фон)	0,1	1,9	4,2	4,4	2,8
6	0,1	8,1	11,4	7,1	11,3
7	0,2	5,1	6,0	11,8	7,9
8	0,1	7,3	9,4	4,2	7,0
9	1,2	11,0	10,5	17,5	43,4
ПДК (ОДК)	2	3	4	32	23

Анализ данных почв не выявил превышений ПДК (ОДК) по кадмию, а также свинцу, однако превышения выявлены по меди, никелю и цинку.

Наибольшие значения меди зафиксированы в точке № 3, неподалеку от Дубненского моста, открытого в конце ноября 2018 г. и уже ставшего одним из главных носителей транспортного потока. Превышения в 2-3 раза обнаружены во всех точках, за исключением фоновой точки № 5, расположенной в лесном массиве. Концентрации никеля превышают ПДК во всех отобранных почвах, а высокие значения по цинку отмечены в точках № 3 (Дубненский мост) и № 9.

Сравнения полученных лабораторных значений с ПДК (ОДК) часто подвергается критике, поскольку в некоторых регионах РФ фоновые значения тяжелых металлов выше нормативных концентраций. Так, фоновое содержание форм тяжелых металлов в почвенном покрове средней полосы России (таблица 3) не совпадает с общепринятыми значениями ПДК (ОДК)[6].

<i>Таблица 3.</i>					
Фоновое содержание валовых форм тяжелых металлов в почве средней полосы России, мг/кг[6]					
Почвы	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Дерново-подзолистые песчаные и супесчаные	0,05	8	6	6	28
Дерново-подзолистые суглинистые	0,12	15	30	15	45
Фоновая точка г. Дубна	0,10	1,9	4,2	4,4	2,8

Как видно из табл. 3, в фоновой точке г. Дубна содержания элементов ниже, чем фон средней полосы России. Также, если сравнить с остальными точками исследования на территории правого берега наукограда, то ситуация приобретает более положительные очертания: превышения по компонентам наблюдаются только в антропогенно нагруженных местах (точки № 1, № 3, № 9).

Таким образом, рассмотрев концентрации тяжелых металлов в грунтах правого берега г. Дубна, можно обнаружить превышения допустимых нормативов. В загрязнителях снежного покрова преобладают медь (Cu) и цинк (Zn), а в почвенном покрове медь (Cu) и никель (Ni). Данные компоненты могут мигрировать из депонирующих сред, тем самым загрязняя грунтовые воды и поверхностные водоемы. Однако, на сегодняшний день состояние г. Дубна характеризуется как экологически благополучная. Этому способствуют обилие лесов и водных объектов. Стоит помнить, что рост антропогенной нагрузки с каждым годом только увеличивается, поэтому необходим регулярный мониторинг.

Литература

1. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Ф. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 181с.
2. Воронцова А.В., Нестеров Е.М. Геохимия снегового покрова в условиях городской среды // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. – 2012. – №147. – С.125-132.
3. ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 7 с.
4. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 12 с.
5. ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация» утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 июля 2020 г. № 384-ст.
6. Каманина И. З., Каплина С.П., Макаров О.А., Кликодуева Н.А. Комплексная оценка экологического состояния наукограда Дубна: Моногр. — Дубна: ОИЯИ, 2019. — 168 с.: ил.
7. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве: Утв. Главным государственным санитарным врачом СССР 15.05.1990. — М., 1990 — 16 с.
8. Методические указания МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест: Утв. и введ. в действие Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации Г. Г.Онищенко 5 февраля 1999 г. [Электронный ресурс]. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003852> (дата обращения: 20.11.2021).
9. Общие сведения о городе Дубна // Инвестиции в Дубну. [Электронный ресурс]. —URL: http://www.investdubna.ru/ru/dubna/about_city/geographical_position(дата обращения: 19.11.2021).
10. РД 52.04.186-89. Руководящий документ. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Государственный комитет СССР по гидрометеорологии. Министерство здравоохранения СССР. — М., 1991. — 695 с.

ГРУНТЫ КАК СОСТАВНАЯ ЧАСТЬ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

М.А. Харькина, А.Валиева, Е.Д. Туляков

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
г. Москва, 11999; Ленинские горы, д.1. E-mail: kharkina@mail.ru

Грунты, как любая горная порода, почва, осадок или антропогенное породообразное геологическое образование, входит составной частью в эколого-геологическую систему. Эколого-геологическая система – это определенный объем литосферы с находящейся в ней и на ней биотой, включая человека и социум, на которые воздействуют природные и техногенные факторы, под влиянием которых развиваются современные геологические процессы в названной системе, влияющие на условия жизни биоты в ее рамках [1]. Абиотическая часть эколого-геологической системы включает породы, подземные воды, нефть и газы, геохимические и геофизические поля и протекающие современные геологические процессы, влияющая на существование и развитие биоты, в том числе и человеческого сообщества. Грунты, обладающие биологической токсичностью, могут влиять на состояние живых организмов.

Оценка биологической токсичности грунтов проводится с помощью биотестирования, суть которого заключается в выявлении токсичности среды обитания (грунтов, донных отложений, почв) к живым организмам в лабораторных условиях. Наиболее распространены два подхода к определению токсичности грунтов.

Первый подход предполагает *использование водных вытяжек и определения их токсичности по отношению к водным организмам*. Для подтверждения сказанного приведем результаты эксперимента. В качестве тест-объекта был выбран вид дафний *Ceriodaphniaaffinis*. В опыте использовались молодые особи в возрасте 4-24 ч после рождения. Разница в возрасте мальков цериодафний одной выборки не превышала 8 ч.

Водные вытяжки изготавливались из донных отложений р.Клязьма, причем для экспериментов использовались пробы донных отложений, отобранные в 2017 г. как на участке очень высокого загрязнения ($Z_c > 100$) от г. Щелково до г.Лосино-Петровский, так и относительно чистые пробы ($Z_c \leq 10$), отобранные в районе впадения левых притоков Клязьмы – рек Пекши, Колокши, Нерли на участке долины от г.Собинка до г.Владимира [11].

Водная вытяжка из донных отложений была приготовлена в соотношении: 1 часть донных отложений и 4 части культивационной воды. Цериодафнии помещали в раствор следующим образом: их отлавливали из химических стаканов, в которых выращивали синхронизированную культуру, пипеткой вместимостью 2 . Помещали их по одной на сачок, через который вода сливалась в отдельный химический стакан, после чего цериодафнии сачком вносили в стаканы с исследуемой водой. Посадку рачков начинали с контрольной серии. В исследуемые растворы цериодафнии помещали, начиная с больших разбавлений (меньших концентраций загрязняющих веществ) к меньшим разбавлениям. После каждой посадки в исследуемые растворы сачок промывали в сосуде объемом 2 с культивационной водой. В течение 48 ч цериодафний не кормили [9]. Затем определялась выживаемость рачков. Особи считали выжившими, если они свободно передвигались в толще воды или всплывали со дна сосуда не позднее 15 с после его легкого покачивания. Результаты выживаемости тест-организмов в водных вытяжках донных отложений р.Клязьма с разным уровнем загрязнения представлены в табл.1.

Нулевая выживаемость рачков в водных вытяжках донных отложений с очень высоким уровнем загрязнения на участке Щелково - Лосино-Петровский свидетельствует об их токсичности по отношению к тест-объектам (табл.1). Предположительно, одной из причин нулевой выживаемости тест-объекта на этом участке долины р.Клязьма являются высокие показатели концентрации тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях. Отметим, что концентрации по цинку и свинцу (Рис. 1) за 14 лет с 2003 по 2017 гг. выросли в пять раз, а по мышьяку и никелю – более чем в 10 раз. Еще одной причиной падения концентраций тяжелых металлов в донных отложениях возможно связано с изменением механического состава: глинистые донные отложения Клязьмы вниз по течению становятся более песчаными, а как известно тяжелые металлы концентрируются преимущественно в глинистых осадках [6].

Таблица 1.

Выживаемость *Ceriodaphniaaffinis* в водных вытяжках донных отложений р.Клязьма с разной степенью загрязнения

Участок отбора донных отложений для получения водных вытяжек	Уровень загрязнения донных отложений	Число выживших/ число испытываемых рачков (шт.)	Средняя выживаемость (%)
Щелково -- Лосино-Петровский	очень высокий ($Z_c > 100$)	0/6	0
		0/7	
		0/7	
Собинка -- Владимир	Слабый ($Z_c \leq 10$)	5/6	70

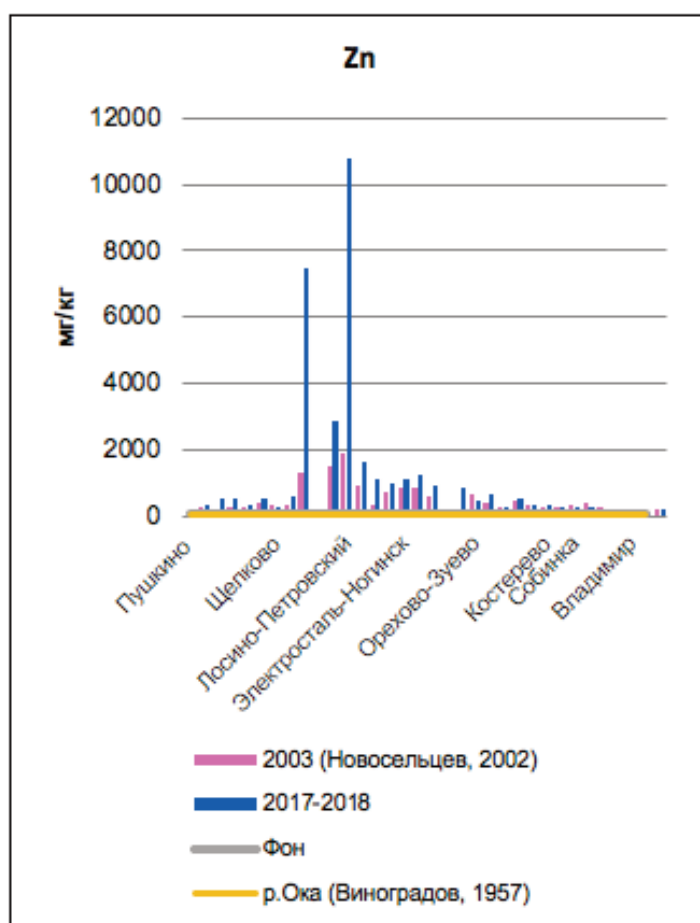


Рис. 1. Увеличение концентраций цинка в донных отложениях р.Клязьма с начала 2000-х гг.

Из литературных источников известно, что токсичные вещества в среде обитания снижают продолжительность жизни ракообразных [3, 12], цинк в повышенных концентрациях разрушает ткани гидробионтов, нарушает дыхание и координацию движений, а медь в избыточных концентрациях приводит к атрофии ряда органов и тканей [7].

Второй подход предполагает оценку токсичности грунтов по отношению к всходам растений. Этот прием используется достаточно широко для биотестирования других абиотических сред – снежного покрова [2], поверхностных вод [5]. В нашем случае в качестве среды произрастания растений использовались органо-минеральные грунты территории Чайдинского нефтегазосного месторождения [10]. Образцы органо-минеральных грунтов отбирались на двух участках территории Чайдинского нефтегазосного месторождения (Якутия): антропогенно неизменном с низкой степенью преобразования ландшафта (по А.Г.Исайченко) и освоенном, на котором ландшафты сильно нарушены или полностью изменены и сейчас ведется нефтедобывающая деятельность,

имеется большое количество грунтовых дорог и колеи от проезда тяжелой техники. В пробах грунтов на освоенном участке имеются превышения относительно ПДК концентраций свинца (1,5 раза). Из других тяжелых металлов отметим повышенные концентрации никеля и меди.

Растения на начальной фазе развития являются наиболее представительным объектом тестирования, а основным показателем является всхожесть семян. Всхожесть характеризуется количеством нормально проросших семян за определенный период времени при определенных оптимальных условиях (кроме изучаемого фактора) по отношению к общему количеству взятых на проращивание семян. Этот показатель выражается в процентах. Кроме всхожести определялась энергией прорастания, характеризующая дружность всходов. Чем выше энергия прорастания, тем дружнее будут всходы. Под энергией прорастания понимается количество нормально проросших семян в течение установленного короткого срока, выраженное в процентах от количества семян, взятых для определения всхожести.

Как известно, грунты аккумулируют загрязнения, поступающие в них с пылевидными выпадениями, дождевыми потоками и стоками. В нашем случае для установления токсичности грунтов использовали в качестве теста реакцию проростков высокочувствительных растений кресс-салата, что регламентировано [4]. В ходе эксперимента выполнялась следующая последовательность действий:

- Испытываемый грунт в воздушно сухом состоянии с помощью ступки и пестика растирали до дисперсного состояния, затем, с помощью пинцета из грунта удаляли все крупные органические остатки (корешки, веточки, насекомые и т.д.), далее, образцы грунта просеивали через сито с размером ячеек в 1 мм.

- Навеска грунта в 60 г отмеряли с помощью электронных весов, навеска помещалась в чашку Петри. Почву увлажняли дистиллированной водой до состояния густой пасты (около 60% от полной влагоемкости) и тщательно, слегка уплотняя, распределяли по чашке Петри.

- Для осуществления инициации развития микроорганизмов на поверхность грунта наносят крахмал тонким слоем (мощностью около 2-3 крахмальных зерен).

- Далее чашки Петри помещались в эксикатор с дистиллированной водой, где находились в течение двух недель при температуре +25 С°.

- После инкубирования на поверхность каждой почвенной пластинки помещались 10 семян кресс-салата, предварительно замоченные в течение суток в водопроводной воде (были помещены на поверхность переувлажненного ватного диска).

- Семена проращивались в течение восьми дней при следующих условиях – постоянная температура около +27 С°, ежедневно с помощью шприца в чашки Петри дополнительно вносилось по

<i>Таблица 2.</i>			
Всхожесть семян кресс-салата (<i>Lepidium sativum</i>) и энергия прорастания на органо-минеральных грунтах территории Чайдинского нефтегазоносного месторождения			
Участок отбора проб	Уровень загрязнения по Z_c	Всхожесть, %	Энергия прорастания, %
Антропогенно неизменный	Допустимый (Z _c < 16)	90	90
		80	60
		80	40
		40	30
		90	70
		80	60
Освоенный и активно используемый	Умеренно опасный (Z _c > 16)	80	80
		60	30
		60	30
		60	10
		30	20
		30	10

2 мл дистиллированной воды, также, ежедневно на минуту открывались чашечки Петри для проветривания и предотвращения развития плесени.

• Период инкубации для определения энергии прорастания составил 4 дня, для определения всхожести был взят срок в 8 дней.

Результаты биотестирования грунтов Чаядинского месторождения представлены в табл.2.

Таким образом, токсичность грунтов, как составной части эколого-геологических систем, оценивается экспериментально с помощью метода биотестирования, позволяющего в короткие сроки оценить их влияние как на водные организмы, так и на сухопутную растительность. Полученные результаты методом биотестирования позволяют дать объективную оценку изменениям, происходящим в комплексе живых организмов. Для этого используются разные показатели: выживаемость микроорганизмов, всхожесть и энергия прорастания семян травянистых культур.

Литература

1. Базовые понятия инженерной геологии и экологической геологии: 280 основных терминов / Под ред. В.Т. Трофимова / Колл. авт.: В.Т. Трофимов, В.А. Королёв, М. А. Харьковина и др. — М.: ОАО Геомаркетинг, 2012. — 320 с.
2. Власов Д.В., Голованов Д.Л., Кошовский Т.С., Малахов Г.А., Минасян Т.Э., Хлынина А.В., Чекменева Н.А., Ястребова Л.В. Индикация по снежному покрову воздействия ОАО «Славнефть-ЯНОС» на ландшафты пригородов Ярославля для оценки экологического риска // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук, М.: Науч.-информ. изд. центр и ред. журн. «Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук» (М.), № 4, 2011.С. 402-408.
3. Гершкович Д.М, Исакова Е.Ф. Действие низких концентраций токсичных веществ на *CeriodaphniaaffinisLilijeberg* в пожизненных испытаниях / Биодиагностика в экологической оценке почв и сопредельных сред: тезисы докладов Международной конференции, Москва 4-6 февраля 2013 г. М.;БИНОМ. Лаборатория знаний. 2013. С.45.
4. ГОСТ Р ИСО18768 2019 Качество почвы. Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях высших растений. М.: Стандартинформ, 2019. 22 с.
5. Зейферт Д.В., Габбасова Д.Т., Шкробель А.А. Информативность и воспроизводимость метода биотестирования и использованием кресс-салата воды / Биодиагностика в экологической оценке почв и сопредельных сред: тезисы докладов Международной конференции, Москва 4-6 февраля 2013 г. М.;БИНОМ. Лаборатория знаний. 2013. С.82.
6. Косов В.И., Иванов Г.Н., Левинский В.В. Исследования загрязнения тяжелыми металлами донных отложений Верхней Волги // Вестник Тверского государственного технического университета. 2002.№1. С.5-9.
7. Мур Дж.В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. М.: Мир, 1987. 285 с.
8. Новосельцев Н. В., Бесфамильный И. Б., Кизяев Б. М., Грэм Т., Добрачев Ю. П., Ильина А.А., Коломийцев Н.В., Майсснер Р., Митрохин А.А. Техногенное загрязнение речных экосистем. М.: Научный мир, 2002. 140 с.
9. Терехова В.А. Биотест-системы для задач экологического контроля: Методические рекомендации по практическому использованию стандартизованных тест-культур/ В.А.Терехова, Л.П.Воронина, Д.В.Гершкович, В.И.Ипатов, Е.Ф.Исакова, С.В.Котелевцев, Т.О.Попутникова, А.А.Рахлеева, Т.А.Самойлова, О.Ф.Филенко. — М.: Изд-во «Доброе слово», 2014 г.- 48 с.
10. Харьковина М.А., Туляков Е.Д. Биотестирование образцов грунтов с целью оценки трансформации эколого-геохимических условий территории Чаядинского нефтегазоносного месторождения / Материалы Международной научно-практической конференции «Закономерности трансформации экологических функций геосфер крупных горнопромышленных регионов», издательство ВГУ (Воронеж), 2020. С. 89-96.
11. Харьковина М.А., Коломийцев Н.В., Валиева А. Изменение эколого-геологической обстановки долины р.Клязьмы (в среднем течении) с начала 2000-х годов // Инженерная геология, издательство Геомаркетинг (М.), № 3, 2020 с. 66-76.
12. Шашкова Т.Л., Григорьев Ю.С. Сравнительная оценка чувствительности показателей выживаемости и трофической активности *DaphniaMagna* при определении токсичности воды / Биодиагностика в экологической оценке почв и сопредельных сред: тезисы докладов Международной конференции, Москва 4-6 февраля 2013 г. М.;БИНОМ. Лаборатория знаний. 2013. С.242.

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО ПРОФИЛЯ ДЕРНОВО-ЛИТОГЕННЫХ ПОЧВ В ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ ДОНБАССА

В.И. Черных, И.Д. Жолудева

ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»,
91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а. E-mail: agroecology.lg@mail.ru

Изучение начальных стадий почвообразования имеет существенный теоретический интерес, что позволяет установить закономерности почвообразования в целом. В частности, это дает возможность раскрыть общие закономерности взаимодействия биологического и геологического круговорота веществ, процессов разложения и синтеза, процессов аккумуляции и выноса, баланса почвообразования. С этой точки зрения отвалы горных пород, которые вынесены на поверхность при добыче полезных ископаемых, являются уникальными объектами. Здесь процессы почвообразования начинаются с нуля.

Анализ литературных данных свидетельствует, что из естественных факторов, которые обуславливают тот или другой микроэлементный состав почвы, на первое место стоит поставить фактор почвообразующей породы, потому что именно от нее почва наследует свой минералогический состав [1, 3-5, 9]. Другим естественным фактором, который определяет содержимое микроэлементов в почве, но имеет меньшее значение и играет подчиненную роль относительно почвообразующей породы, является само почвообразование. В результате почвообразующих процессов происходит перераспределение микроэлементов по профилю, их биогенная аккумуляция в гумусовых горизонтах или рассеивание за счет элювиально-иллювиальных процессов, которые затрагивают наиболее обогащенную микроэлементами тонкодисперсную фракцию.

Объектом изучения является формирование микроэлементного профиля дерново-литогенных почв техногенных ландшафтов Донбасса под травянистыми и лесокультурными экосистемами на спланированных отвалах Часов-Ярского месторождения огнеупорных глин (Донецкая область).

Дерново-литогенные почвы образованы на спланированных отвалах, сложенных среднечетвертичными отложениями: лессовидными суглинками и рыхлыми осадочными породами палеогеновой и неогеновой свит - песками полтавского яруса. До начала фитомелиорации породы представляли собой недифференцированную массу с однородными свойствами по всему профилю. Начальное содержимое органического вещества в породе колеблется от 0,20% - на песках супесчаного гранулометрического состава до 0,57% - на лессовидных суглинках средне- и тяжелосуглинистого гранулометрического состава.

В настоящее время возраст исследованных дерново-литогенных почв, которые образовались на отвалах горных пород, составляет более 40 лет.

Определение валового содержимого микроэлементов (Cu, Ni, Cd, Pb, Cr) в исследуемых почвах проводилось методом атомно-адсорбционной спектрофотометрии по методике ЦИНАО [7].

Исследования показали, что профиль дерново-литогенных почв дифференцирован на два горизонта - в верхней его части выделяется четко выраженный гумусово-аккумулятивный горизонт, мощность которого визуальным образом определяется по темной окраске и комковато-зернистой структуре и составляет 10-12 см. Нижняя часть профиля до глубины 1,5-2,0 м составлена горными породами, которые выступают в качестве почвообразующих - лессовидными суглинками и песками полтавского яруса. Диапазон колебаний содержания органического вещества обусловлен как типом почвообразующей породы, а именно исходными показателями ее химического состава, так и типом растительности, которая продуцирует различное количество органических остатков - основных источников для образования органического вещества почвы (Рис. 1).

Содержание органического вещества на лессовидном суглинке под разнотравно-злаковой растительностью и под лесными насаждениями из лиственных пород приблизительно одинаковое (2,33 и 2,59 % соответственно) и находятся на низком уровне, что обусловлено маломощностью гумусового горизонта и сжатостью почвенного профиля. На песке палеогена легкого гранулометрического состава в слое 0-10 см содержание органического вещества в два раза меньше, чем на лессовидном суглинке тяжелосуглинистого гранулометрического состава.

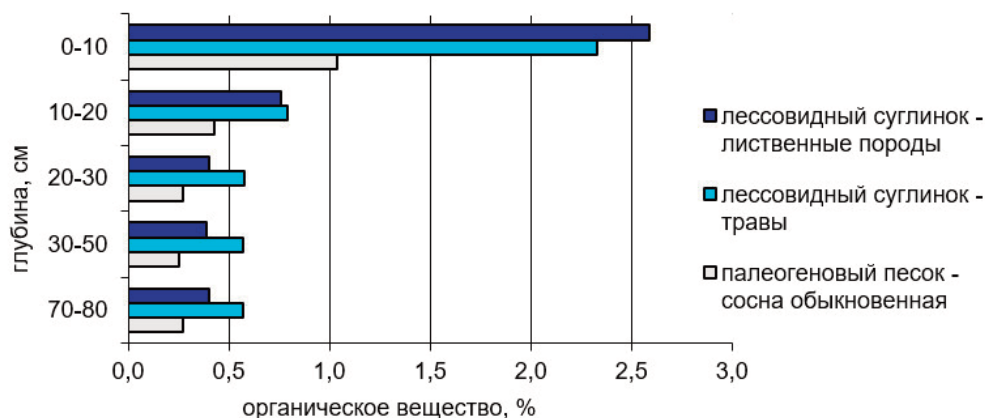


Рис. 1. Содержание органического вещества в дерново-литогенных почвах Донбасса.

Состав и разнообразие почвообразующих пород определяют геохимический фон микроэлементов в почвах [6]. Диапазон колебаний валового содержания микроэлементов в дерново-литогенных почвах обусловлен, в первую очередь, химическим и гранулометрическим составом почвообразующих пород. Лессовидные суглинки по своей природе содержат в 1,3-1,8 раза больше меди, свинца, кадмия и хрома и в 1,8-2 раза больше никеля по сравнению с полтавскими песками. Уровень содержания меди, свинца, хрома и никеля в почвах как на лессовидном суглинке, так и на элювии песчаника выше их кларков и фоновых значений для Донбасса (табл. 1).

Таблица 1.

Содержание микроэлементов в гумусовом горизонте дерново-литогенных почв Донбасса, мг/кг

Элемент и его кларк [8]	Почва на лессовидном суглинке		Фон для черноземов обыкновенных на лессовых породах для Донбасса [2]	Почва на полтавском песке под сосной обькн.	Фон для черноземов на песчаных породах для Донбасса [2]
	под лиственными породами	под травами			
Cu-22	26,2/22,5-29,4	32,6/23,5-41,7	23/ 14-36	18,3/18,0-19,5	15/11-27
Pb-13	25,1/16,6-28,5	21,2/17,7-24,6	12/10-30	18,6/16,2-20,0	13/10-15
Cd-	0,08/0,07-0,11	0,11/0,09-0,12	нет данных	0,06/0,06-0,07	нет данных
Cr-48	110,3/95,0-121,1	113,0/111-115	47/37-58	83,5/62,9-104,0	32/25м44
Ni-20	46,2/38,9-54,7	41,2/29,0-53,4	16/13-24	24,3/19,2-31,4	12/10-14

Примечание: в числителе – среднее содержание, в знаменателе – предел колебаний.

В современной литературе у разных авторов, уровни кларков и фонового содержания многих химических элементов в одних и тех же породах и почвах сильно разнятся. Так кларк хрома по А.П. Виноградову - 200 мг/кг, по А.И. Перельману - 83, по А.И. Фатееву - 48 мг/кг почвы [1, 6, 9]. По нашим данным в черноземах Донецкого региона естественное содержание хрома в среднем составляет 80 мг/кг почвы. Кларк никеля по А.П. Виноградову - 40 мг/кг, по А.И. Фатееву - 20 мг/кг почвы. Для кадмия данные у большинства авторов вообще отсутствуют, только по данным А. Кабата-Пендиас среднее содержание кадмия в суглинистых и глинистых почвах составляет 0,26 мг/кг почвы [4]. Поэтому с точки зрения техногенного загрязнения более объективно анализировать не фактическое содержание того или иного микроэлемента в почве, сравнивая его с фоном, а сравнивать содержание химического элемента в верхнем гумусовом горизонте с его содержанием в почвообразующей породе в пределах одного профиля.

За 40-летний период развития в дерново-литогенных почвах отмечается тенденция к перераспределению микроэлементов по профилю до глубины 10-12 см в связи с биогенным накоплением меди, свинца и кадмия (Рис. 2).

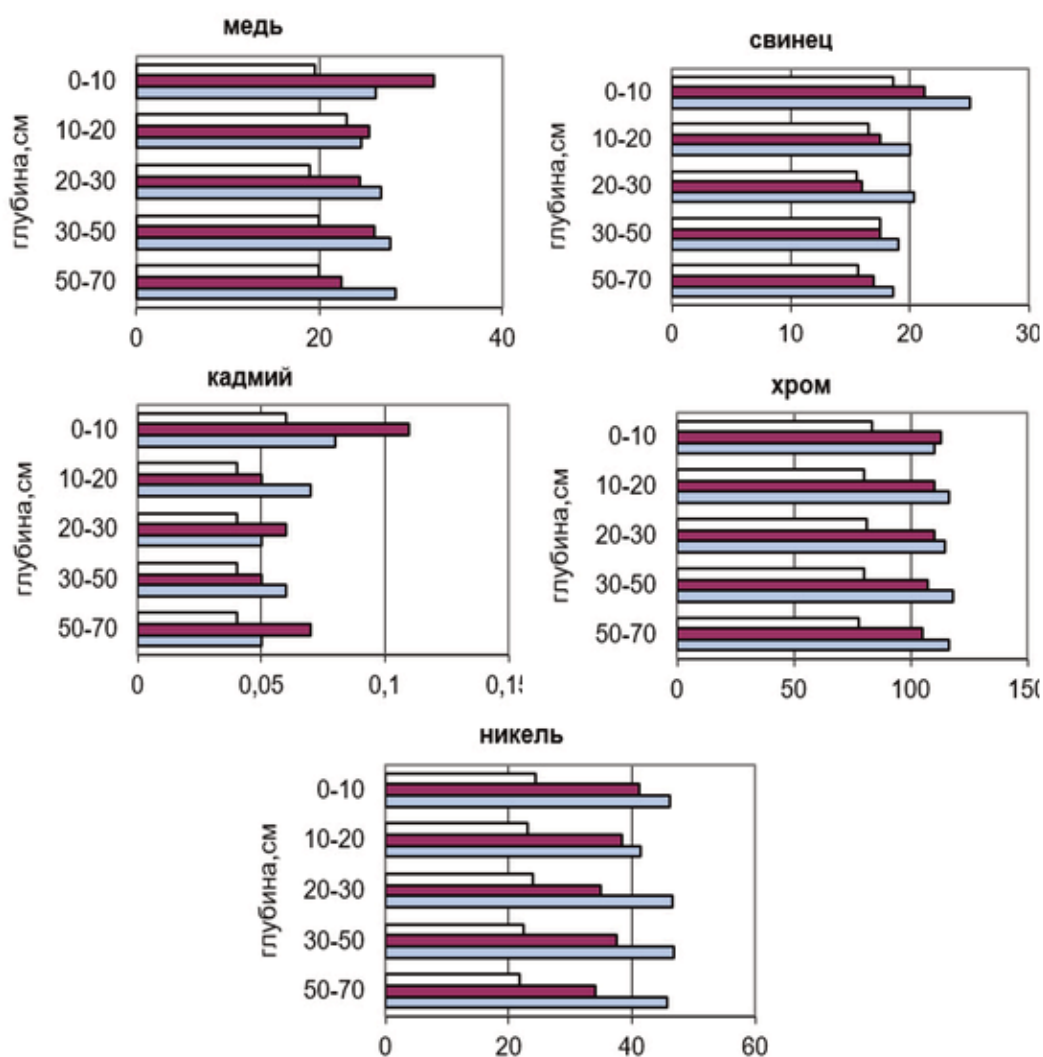


Рис. 2. Содержание микроэлементов в профилях дерново-литогенных почв Донбасса (в мг/кг):

- - почва на лессовидном суглинке под лесонасаждениями из лиственных пород;
- - почва на лессовидном суглинке под травами;
- - почва на палеогеновом песке под сосной обыкновенной.

Наиболее тесная корреляционная связь с органическим веществом почвы установлена для меди и кадмия ($r=0,81$), для свинца эта связь менее значительная ($r=0,69$). Содержание хрома и никеля стабильно по глубине на всех почвах независимо от типа растительности и почвообразующей породы.

Как количественную характеристику почвообразования с точки зрения перераспределения микроэлементов по почвенному профилю мы использовали их коэффициенты аккумуляции-рассеивания относительно почвообразующей породы. Эти коэффициенты зависят от почвообразования, которое мало изменяется в пределах почвы одного подтипа и гранулометрического состава. Исходя из этой связи, коэффициенты аккумуляции-рассеивания можно рассматривать как нормативные показатели, которые характеризуют действие почвообразующего процесса в почве данного подтипа и гранулометрического состава [8].

На всех исследованных нами почвах наблюдается одинаковая тенденция в перераспределении микроэлементов по профилю. Относительно высокое содержание органического вещества, тяжелый гранулометрический состав, слабощелочная реакция почвенного раствора (рН 7,8-7,9) в почвах на лессовидном суглинке обуславливают развитие аккумулятивных процессов микроэлементов. Наиболее стабильные значения коэффициенты имеют на почвах, сформированных на лессовидных суглинках под травянистой растительностью (1,1-1,6), что, вероятно, происходит за счет образования более устойчивых органо-минеральных комплексов под этой растительностью и, как следствие, более выраженной биогенной аккумуляции микроэлементов (табл. 2).

Таблица 2.

Коэффициенты аккумуляции-рассеивания (Кар) в дерново-литогенных почвах Донбасса

Элемент	Профиль	Средние значения Кар			
		почва на лессовидном суглинке		почва на палеогеновом песке	Чернозем обыкновенный [8]
		лиственные породы	травы	Хвойные породы	
Cu	1	0,9	1,5	0,9	1,5
	2				
Pb	1	1,4	1,3	1,2	1,3
	2				
Cd	1	1,6	1,6	1,5	-
	2				
Cr	1	0,9	1,1	1,0	0,9
	2				
Ni	1	1,0	1,2	1,1	0,9
	2				

Примечание: 1 – слой 0-10 см; 2 – почвообразующая порода

Наиболее сильно аккумулируются медь, свинец и кадмий. Наименьшей стабильностью характеризуются коэффициенты в почвах, образованных на песках палеогена под лесонасаждениями сосны обыкновенной (0,9-1,5), что связано со значительной лабильностью органического вещества и более низкими значениями реакции почвенного раствора (рН 7,1) под этими насаждениями по сравнению с травянистой растительностью и насаждениями из лиственных пород. Наибольшая аккумуляция в слое 0-10 см относительно почвообразующей породы на песчаных породах под сосной обыкновенной отмечается для Cd, что обусловлено повышенной подвижностью этого элемента по сравнению с другими при низких значениях рН [4].

Для травяного фитоценоза на лессовидном суглинке коэффициенты аккумуляции-рассеивания для всех элементов больше единицы, что свидетельствует об их аккумуляции в слое 0-10 см относительно почвообразующей породы.

В целом, коэффициенты аккумуляции-рассеивания дерново-литогенных почв близки к значениям этих показателей в породах и зональных почвах Донбасса [2]. Но неоднородность осадочных горных пород, выступающих в качестве почвообразующих, усложняет оценку фактической степени перераспределения химических элементов в почвенном профиле непосредственно в результате почвообразовательных процессов. В силу недостаточного промежутка времени процессы почвообразования происходят лишь в самих поверхностных (не более 10-12 см) слоях минеральной основы, а процесс формирования химического профиля почвы является очень сложным, длительным и требует дальнейшего изучения.

Выводы

В качестве количественной характеристики почвообразования с точки зрения перераспределения микроэлементов по профилю в дерново-литогенных почвах можно использовать коэффициенты аккумуляции-рассеивания микроэлементов относительно почвообразующей породы. Коэффициенты аккумуляции-рассеивания дерново-литогенных почв в техногенных ландшафтах Донбасса близки к значениям этих показателей в породах и зональных почвах региона. Наиболее стабильные значения коэффициенты аккумуляции-рассеивания микроэлементов выявлены на почвах, сформированных на лессовидных суглинках под травянистой растительностью за счет образования устойчивых органо-минеральных комплексов.

Литература

1. *Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 238 с.*
2. *Головина А.М. Микроэлементы в породах почвах и Донбасса / А.М. Головина, М.Н. Лысенко, А.М. Александрова // Почвоведение. 1987. № 6. С.116-125.*
3. *Ильин В.Б. К вопросу о разработке предельно допустимых концентраций тяжелых металлов в почвах / В.Б. Ильин // Агрохимия. 1985. № 10. С. 94-101.*
4. *Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях / Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. М.: Мир, 1989. 439 с.*
5. *Ковальский В.В. Микроэлементы в почвах СССР / В.В. Ковальский, Г.А. Андрианова. М., 1970. 180 с.*
6. *Ковда В.А., Якушевская И.В., Тюрюканов А.Н. Микроэлементы в почвах Советского Союза М.: Узд-во МГУ. 1959. 67 с.*
7. *Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства / А.В. Кузнецов, А.П. Фесюн, С.Г. Самохвалов, Э.П. Махонько. М., 1992. 62 с.*
8. *Муха В.Д. Соотношение содержания тяжелых металлов в почве и почвообразующей породе как критерий оценки загрязнения почв / В.Д. Муха, А.Ф. Сулима, Т.В. Карпинец // Почвоведение. 1998. № 10. С. 1265– 1270.*
9. *Фоновий вміст мікроелементів у ґрунтах України / А.І. Фатєєва, Я.В. Пащенко. Харків, 2003. 120 с.*

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

- Абакумова Н.В., Аверин И.В., Николаева С.К., Камышанова Н.П. Насыпные грунты Петровского бастиона Псково-Печерского монастыря, с. 43
- Абатурова И.В., Королева И.А., Стороженко Л.А., Савинцев И.А. Оценка массива горных пород как конструктивного элемента горного сооружения, с. 142
- Абатурова И.В., см. Быкова А.В., с. 154
- Абдрахманов Р.Ф. Защитные противодиффузионные модели основания полигона утилизации твердых промышленно-бытовых отходов, с. 333
- Абрамова Т.Т. Искусственное преобразование слабых грунтов, с. 339
- Аверин И.В., см. Абакумова, с. 43
- Аверин И.В., см. Зеркаль О.В., с. 60
- Аверин И.В., см. Самарин Е.Н., с. 117
- Алёшин Ю.Г., см. Торгоев И.А., с. 224
- Андреева Т.В., см. Барыкина О.С., с. 148
- Анисимова Н.Г., см. Козлякова И.В., с. 199
- Архипова М.В., см. Орлов Т.В., с. 314
- Барановский А.Г. Влияние условий проведения лабораторных испытаний элювиальных глинистых грунтов на их механические свойства, с. 239
- Барыкина О.С., Зеркаль О.В., Андреева Т.В., Гвоздева И.П. Роль песчаных толщ в развитии деформаций на склоне Воробьевых гор в Москве, с. 148
- Батракова Г.М., Слюсарь Н.Н., Тарабара А.В. Результаты эколого-гигиенического обследования территорий ликвидированных шахтных пусковых установок в Пермском крае, с. 345
- Березина О.А., см. Максимович Н.Г., с. 385
- Большаков И.Е., Житова Е.С., Нуржандаев А.А. Определение свойств гидротермально измененных пород с помощью молотка Шмидта (Большой Семячик, Камчатка), с.
- Большаков И.Е., см. Фролова Ю.В., с. 244
- Бондарь В.В., см. Орлов Т.В., с. 314
- Бузина Д.А., см. Рыбников П.А., с. 422
- Бурлуцкий С.Б., см. Евенкова Т.Д., с. 257
- Быкова А.В., Абатурова И.В. Исследование динамики температур грунтового массива на участках развития овражной термоэрозии в ПТС криолитозоны, с. 154
- Бычков О.А., см. Ольховатенко В.Е., с. 103
- Валиева А., см. Харькина М.А., с. 449
- Васенин В.А. см. Шашкин А.Г., с. 133
- Васенин В.А., см. Шашкин А.Г., с. 133
- Вилькина М.В., Никуленков А.М., Румынин В.Г. Изучение фильтрационной неоднородности кембрийских глин при обосновании окончательной изоляции токсичных отходов, с. 48
- Габиров Ф.Г. Энергоэнтропия набухания глинистых грунтов, с. 5
- Габиров Ф.Г., Зейналов А.З. Исследование устойчивости однородных глинистых склонов, нагруженных равномерно распределенными нагрузками на локальных участках, с. 251
- Галин А.Н., см. Рыбникова Л.С., с. 428
- Галицкая И.В., Костинова И.А. Изучение загрязненных грунтов как вторичного источника загрязнения на территориях размещения полигонов ТКО, с. 348
- Галкин А.Н., см. Красовская И.А., с. 364
- Гараева А.Н., см. Латыпов А.И., с. 78
- Гвоздева И.П., см. Барыкина О.С., с. 148
- Гвоздева И.П., см. Зеркаль О.В., с. 60
- Генсиоровский Ю.В., см. Ухова Н.Н., с. 230
- Григорьева И.Ю., Морозов А.В., Садов С.С. Биодиагностика экологического состояния дисперсных грунтов, с. 355
- Гридневский А.В. Историко-геологические аспекты неотектонических процессов на территории г. Ростов-на-Дону, с. 159
- Гусельцев А.С., см. Кравченко И.М., с. 72
- Данзанова М.В., см. Павлова Н.А., с. 110

- Деменев А.Д., см. Максимович Н.Г., с. 385
- Дернова Е.О., см. Карпенко Ф.С., с. 270
- Дробинина Е.В. Особенности свойств коренных отложений в обстановках развития карбонатно-сульфатного карста, с. 169
- Евенкова Т.Д., Бурдуцкий С.Б., Лаздовская М.А., Татарский А.Ю., Карам Ж.С., Хомутинников С.Н. Оценка изменения свойств дисперсных грунтов под влиянием постоянных токов системы электрохимической защиты трубопроводов от коррозии, с. 257
- Екимова О.А., см. Парфенова Л.П., с. 391
- Елохина С.Н., Зырянова Е.С., Худяков А.А. Использование БПЛА при аэрофотосъемке бугров пучения на территории ЯНАО с последующей обработкой в программном обеспечении, с. 263
- Ерзова В.А., Стародубова Ю.П., Новицкая О.И., Румынин В.Г., Никуленков А.М. Палеодолина как осложняющий фактор при строительстве ЛАЭС-2, с. 54
- Житова Е.С., см. Большаков И.Е., с. 244
- Жолудева И.Д., см. Черных В.И., с. 453
- Зарипова Г.З., см. Фролова Ю.В., с. 128
- Зейналов А.З., см. Габибов Ф.Г., с. 251
- Зеркаль О.В., Самарин Е.Н., Гвоздева И.П. Особенности состава и строения лессовых толщ южного берега Крыма, с. 60
- Зеркаль О.В., Самарин Е.Н., Чернов М.С., Аверин И.В., Новиков П.В. Изменение состава и строения юрских глин в зоне оползневых смещений на участке «Воробьевы горы» (г.Москва), с. 175
- Зеркаль О.В., см. Барыкина О.С., с. 148
- Зеркаль О.В., см. Самарин Е.Н., с. 117
- Зуб О.Н. К вопросу эколого-геологического влияния углеводородного загрязнения на свойства дисперсных грунтов, с. 362
- Зырянова Е.С., см. Елохина С.Н., с. 263
- Иванов А.А., см. Матюшенко А.А., с. 309
- Ивануш И.В. Опыт инженерно-геологических изысканий под ВЭС на примере объектов Ставропольского края, с. 66
- Ионов В.Ю., см. Миронюк С.Г., с. 202
- Казеев А.И., см. Постоев Г.П., с. 31
- Камышанова Н.П., см. Абакумова, с. 43
- Караваева Т.И., см. Ушакова Е.С., с. 437
- Карам Ж.С., см. Евенкова Т.Д., с. 257
- Карпенко Ф.С. Свойства глинистых грунтов с позиций физико-химической теории прочности, с. 13
- Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Дернова Е.О., Осокин А.А. Методы исследования свойств мерзлых грунтов и прогноза их изменения, с. 270
- Килин Ю.А., Минькевич И.И., Фаисханов Д.Р. Обвальное-карстовые отложения и ольховская карстовая брекчия в карстовых массивах Пермского края, с. 182
- Клокова Ю.В., Петрова И. Г., Ковязин И.Г. Геоэкологическое картографирование и биоиндикация ландшафтов с применением ГИС-технологий, с. 277
- Ковалёва Т.Г., Селина З.В., Чижова В.А., Новикова А.А. Влияние глинистых отложений на активность развития карста, с. 187
- Ковязин И.Г., см. Клокова Ю.В., с. 277
- Кожевникова И.А., см. Козлякова И.В., с. 199
- Козлов В.С., см. Корчак С.А., с. 282
- Козлов В.С., Стороженко Л.А., Мазаитова Э.Д., Королева И.А. Инженерно-геологическое обоснование прогноза устойчивости горных выработок на этапах поисково-разведочных работ, с. 193
- Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Анисимова Н.Г. Изучение закарстованности и разрушенности каменноугольного карбонатного массива на территории Москвы, с. 199
- Королев В.А., см. Трофимов В.Т., с. 37
- Королев В.А. Теоретическое грунтоведение и его задачи, с. 21
- Королев Э.А., см. Латыпов А.И., с. 78
- Королева И.А., см. Абатурова И.В., с. 142
- Королева И.А., см. Козлов В.С., с. 193
- Корчак С.А., Савинцев И.А., Козлов В.С., Петрова И.Г. Оценка степени трещиноватости массива МПИ с использованием альтернативных методов, с. 282

- Корчак С.А., см. Лымарь И.О., с. 84
- Костикова И.А., см. Галицкая И.В., с. 348
- Кравченко И.М., Гусельцев А.С., Пикулик Е.А., Макеев В.М. Влияние погребенного рельефа на устойчивость площадки Балаклавской АЭС, с. 72
- Красовская И.А., Галкин А.Н. Техногенные грунты на территории г. Витебска и геоэкологические аспекты их изучения, с. 364
- Кутергин В.Н., см. Карпенко Ф.С., с. 270
- Кучуков М.М., см. Постоев Г.П., с. 31
- Лаврусевич А.А., см. Хамраев Б., с. 235
- Ладыгин В.М., см. Фролова Ю.В., с. 128
- Лаздовская М.А., см. Евенкова Т.Д., с. 257
- Ларионова Н.А. Особенности процессов твердения гидратированных зол и зологрунтовых систем, с. 372
- Латыпов А.И., Гараева А.Н., Королев Э.А. Карбонатные элювиальные грунты Бугульминско-Белебеевской возвышенности, с. 78
- Локтев А.С. Современные методы исследований грунтов шельфа, с. 286
- Лымарь И.О., Корчак С.А., Михайлова А.О. Отличительные черты физико-механических свойств брусита, с. 84
- Любимова Т.В. Исследование параметров деформируемости грунта при условии его насыщения керосином, с. 291
- Мавлянова Н.Г., см. Таджибаева Н.Т., с. 124
- Мазаитова Э.Д., см. Козлов В.С., с. 193
- Макаров В.Н. Миграция соединений азота в мерзлых и талых грунтах городского культурного слоя, с. 380
- Макарова Н.В., см. Суханова Т.В., с. 434
- Макеев В.М., см. Кравченко И.М., с. 72
- Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т., Мещерякова О.Ю., Березина О.А., Деменев А.Д. Формирование техногенных донных отложений под влиянием изливов кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна, с. 385
- Мамаев Ю.А. О морфологическом составе и свойствах коммунальных отходов, с. 388
- Манухин И.В. Влияние циклического промерзания-оттаивания на минеральный состав, строение и свойства модельных дисперсных грунтов, с. 295
- Матвеев В.В., Шанина В.В. Систематизация факторов, влияющих на точность графических построений для определения напряжения предуплотнения, с. 301
- Матюшенко А.А., Иванов А.А., Посеренин А.И. Геофизические методы при картировании загрязнений углеводородами, с. 309
- Мещерякова О.Ю., см. Максимович Н.Г., с. 385
- Минькевич И.И., см. Килин Ю.А., с. 182
- Мирный А.Ю. Энергетический подход к интерпретации результатов испытаний трехосного сжатия, с. 27
- Миронюк С.Г., Ионов В.Ю. Оценка сейсмической разжижаемости грунтов Баренцева моря, с. 202
- Михайлова А.О., см. Лымарь И.О., с. 84
- Морозов А.В., см. Григорьева И.Ю., с. 355
- Мосина А.С. Грунтовые толщи Харасавэйского газоконденсатного месторождения как объект для создания хранилищ буровых отходов, с. 87
- Наволокина В.Ю., см. Рыбникова Л.С., с. 428
- Николаева С.К., см. Абакумова, с. 43
- Никуленков А.М., см. Вилькина М.В., с. 48
- Никуленков А.М., см. Ерзова В.А., с. 54
- Новиков П.В., см. Зеркаль О.В., с. 175
- Новикова А.А., см. Ковалёва Т.Г., с. 187
- Новицкая О.И., см. Ерзова В.А., с. 54
- Нуждаев А.А., см. Большаков И.Е., с. 244
- Овечкина О.Н. Особенности инженерно-геологических условий, влияющих на размещение храма святой великомученицы Екатерины (г. Екатеринбург), с. 95
- Огонеров В.В., см. Павлова Н.А., с. 110
- Ольховатенко В.Е., Бычков О.А., Филиппова Н.А. Исследования состава и физико-механических свойств скальных грунтов Александровского золоторудного месторождения Забайкалья, с. 103

- Орлов Т.В., Бондарь В.В., Архипова М.В., Шахматов К.Л. Оценка обводненности торфяных грунтов осушенных болот по дистанционным данным, с. 314
- Осокин А.А., см. Карпенко Ф.С., с. 270
- Павлова Н.А., Данзанова М.В., Огонеров В.В. Особенности взаимосвязи поверхностных и подземных вод на пойменно-намывной территории г. Якутска, с. 110
- Парфенова Л.П., Екимова О.А. Изучение фильтрационных свойств твердых шламов накопителей при гидрогеоэкологических исследованиях, с. 391
- Пеллинен В.А., Черкашина Т.Ю. Оползневые смещения как механизм миграции тяжелых металлов в береговой зоне острова Ольхон, озера Байкал, с. 394
- Перевожикова А.Д. Эколого-геохимическая оценка донных отложений рек Березниковского городского округа, с. 399
- Петрова И. Г., см. Клокова Ю.В., с. 277
- Петрова И.Г., см. Корчак С.А., с. 282
- Пикулик Е.А., см. Кравченко И.М., с. 72
- Помеляйко И.С. Метод эколого-геохимической оценки состояния почв территории природно-технической системы, с. 407
- Посеренин А.И., см. Матюшенко А.А., с. 309
- Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М. Поведение грунтов и диссипативных геологических структур при образовании оползневого блока, с. 31
- Родькина И.А., Самарин Е.Н. Влияние аутигенных пленок на поглощающую способность песчаных грунтов по отношению к свинцу, с. 414
- Романов В.В. Применение инженерной сейсморазведки при оценке карстово-суффозионной опасности на примере Московского региона, с. 208
- Румынин В.Г., см. Вилькина М.В., с. 48
- Румынин В.Г., см. Ерзова В.А., с. 54
- Рыбников П.А., Рыбникова Л.С., Бузина Д.А., Смирнов А.Ю. Оценка самореабилитации территории Левихинского рудника по данным индекса NDVI, с. 422
- Рыбников П.А., см. Рыбникова Л.С., с. 422
- Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю., Галин А.Н. Гидрогеоэкологические аспекты изучения техногенных отходов отработанного Левихинского медноколчеданного рудника (Свердловская область), с. 428
- Рыбникова Л.С., см. Рыбников П.А., с. 422
- Ряценок Т.Г. Методы литологии в региональном грунтоведении, с. 320
- Ряценок Т.Г., см. Ухова Н.Н., с. 320
- Савинцев И.А., см. Абатурова И.В., с. 142
- Савинцев И.А., см. Корчак С.А., с. 282
- Садов С.С., см. Григорьева И.Ю., с. 355
- Самарин Е.Н., Аверин И.В., Зеркаль О.В., Чернов М.С., Щепетова Е.В. Инженерно-геологические особенности состава, строения и свойств песчаников швентойского горизонта верхнего девона, с. 117
- Самарин Е.Н., см. Зеркаль О.В., с. 175
- Самарин Е.Н., см. Родькина И.А., с. 414
- Самарин Е.Н., см. Зеркаль О.В., с. 60
- Селина З.В., см. Ковалёва Т.Г., с. 187
- Слюсарь Н.Н., см. Батракова Г.М., с. 345
- Смирнов А.Ю., см. Рыбников П.А., с. 422
- Стародубова Ю.П., см. Ерзова В.А., с. 54
- Стафеев А.Н., см. Суханова Т.В., с. 434
- Стороженко Л.А., см. Абатурова И.В., с. 142
- Стороженко Л.А., см. Козлов В.С., с. 193
- Стром А.Л. Гранулометрический состав и строение отложений каменных лавин – ключ к пониманию механизма их перемещения, с. 211
- Суханова Т.В., Макарова Н.В., Стафеев А.Н. Мезо-кайнозойские отложения Зауральского пенеплена как среда захоронения опасных промышленных отходов, с. 434
- Таджибаева Н.Т., Мавлянова Н.Г. Исследование свойств и состояния грунтов в основании древних памятников архитектуры г. Бухара, с. 124

- Тарабара А.В., см. Батракова Г.М., с. 345
- Татарский А.Ю., см. Евенкова Т.Д., с. 257
- Торгоев И.А. Ползучесть отвалов на высокогорном руднике Кумтор, с. 218
- Торгоев И.А., Алёшин Ю.Г. Оползни сейсмогенного разжижения в лёссовидных суглинках, с. 244
- Трофимов В.Т., Королев В.А. Новые фундаментальности в учебниках по грунтоведению и инженерной геологии, с. 37
- Туляков Е.Д., см. Харьковина М.А., с. 449
- Ухова Н.Н., Генсиоровский Ю.В., Рященко Т.Г. Особенности состава и свойств грунтов селевых отложений в зоне распространения многолетнемерзлых пород, с. 230
- Ушакова Е.С., Караваева Т.И. Особенности геоэкологического состояния почв в промышленных зонах, с. 437
- Фаисханов Д.Р., см. Килин Ю.А., с. 182
- Федорук Н.А. Геохимическое загрязнение тяжелыми металлами грунтов правобережной части г. Дубна, с. 444
- Филиппова Н.А., см. Ольховатенко В.Е., с. 103
- Фролова Ю.В., Зарипова Г.З., Большаков И.Е., Ладыгин В.М. Инженерно-геологические особенности базальтов вулкана Толбачик, с. 128
- Хамраев Б., Лаврусевич А.А. Подтопление и статические нагрузки как основные факторы изменения сейсмических свойств лессовых грунтов, с. 235
- Харьковина М.А., Валиева А., Туляков Е.Д. Грунты как составная часть эколого-геологической системы, с. 449
- Хмурчик В.Т., см. Максимович Н.Г., с. 385
- Хомутинников С.Н., см. Евенкова Т.Д., с. 257
- Худяков А.А., см. Елохина С.Н., с. 263
- Черкашина Т.Ю., см. Пеллинен В.А., с. 394
- Чернов М.С., см. Зеркаль О.В., с. 175
- Чернов М.С., см. Самарин Е.Н., с. 117
- Черных В.И., Жолудева И.Д. Формирование микроэлементного профиля дерново-литогенных почв в техногенных ландшафтах Донбасса, с. 453
- Чижова В.А., см. Ковалёва Т.Г., с. 187
- Шанина В.В., см. Матвеев В.В., с. 301
- Шахматов К.Л., см. Орлов Т.В., с. 314
- Шашкин А.Г., Васенин В.А. Развитие неравномерных осадок Исаакиевского собора, с. 133
- Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Васенин В.А. О предсказательной способности моделей механики грунтов, с. 326
- Шашкин К.Г., см. Шашкин А.Г., с. 133
- Щепетова Е.В., см. Самарин Е.Н., с. 117

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Предисловие</i>	4
1. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ГРУНТОВЕДЕНИЯ	
<i>Габиров Ф.Г.</i> Энергоэнтропия набухания глинистых грунтов	5
<i>Карпенко Ф.С.</i> Свойства глинистых грунтов с позиций физико-химической теории прочности	13
<i>Королёв В.А.</i> Теоретическое грунтоведение и его задачи	21
<i>Мирный А.Ю.</i> Энергетический подход к интерпретации результатов испытаний трехосного сжатия	27
<i>Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М.</i> Поведение грунтов и диссипативных геологических структур при образовании оползневых блоков	31
<i>Трофимов В.Т., Королев В.А.</i> Новые фундаментальности в учебниках по грунтоведению и инженерной геологии	37
2. ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ГРУНТОВ В ПРАКТИКЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ	
<i>Абакумова Н.В., Аверин И.В., Николаева С.К., Камышанова Н.П.</i> Насыпные грунты Петровского бастиона Псково-Печерского монастыря	43
<i>Вилькина М.В., Никуленков А.М., Румынин В.Г.</i> Изучение фильтрационной неоднородности кембрийских глин при обосновании окончательной изоляции токсичных отходов	48
<i>Ерзова В.А., Стародубова Ю.П., Новицкая О.И., Румынин В.Г., Никуленков А.М.</i> Палеодолина как осложняющий фактор при строительстве ЛАЭС-2	54
<i>Зеркаль О.В., Самарин Е.Н., Гвоздева И.П.</i> Особенности состава и строения лессовых толщ южного берега Крыма	60
<i>Иванусь И.В.</i> Опыт инженерно-геологических изысканий под ВЭС на примере объектов Ставропольского края	66
<i>Кравченко И.М., Гусельцев А.С., Пикулик Е.А., Макеев В.М.</i> Влияние погребенного рельефа на устойчивость площадки Балаклавской АЭС	72
<i>Латыпов А.И., Гараева А.Н., Королев Э.А.</i> Карбонатные элювиальные грунты Бугульминско-Белебеевской возвышенности	78
<i>Лымарь И.О., Корчак С.А., Михайлова А.О.</i> Отличительные черты физико-механических свойств брусита	84
<i>Мосина А.С.</i> Грунтовые толщи Харасавэйского газоконденсатного месторождения как объект для создания хранилищ буровых отходов	87
<i>Овечкина О.Н.</i> Особенности инженерно-геологических условий, влияющих на размещение храма святой великомученицы Екатерины (г. Екатеринбург)	95
<i>Ольховатенко В.Е., Бычков О.А., Филиппова Н.А.</i> Исследования состава и физико-механических свойств скальных грунтов Александровского золоторудного месторождения Забайкалья	103
<i>Павлова Н.А., Данзанова М.В., Огонеров В.В.</i> Особенности взаимосвязи поверхностных и подземных вод на пойменно-намывной территории г. Якутска	110
<i>Самарин Е.Н., Аверин И.В., Зеркаль О.В., Чернов М.С., Щепетова Е.В.</i> Инженерно-геологические особенности состава, строения и свойств песчаников швентойского горизонта верхнего девона	117
<i>Таджибаева Н.Т., Мавлянова Н.Г.</i> Исследование свойств и состояния грунтов в основании древних памятников архитектуры г. Бухара	124
<i>Фролова Ю.В., Зарипова Г.З., Большаков И.Е., Ладыгин В.М.</i> Инженерно-геологические особенности базальтов вулкана Толбачик	128
<i>Шашкин А.Г., Васенин В.А.</i> Развитие неравномерных осадков Исаакиевского собора	133

3. ИЗУЧЕНИЕ МАССИВОВ ГРУНТОВ В ЦЕЛЯХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

<i>Абатурова И.В., Королева И.А., Стороженко Л.А., Савинцев И.А.</i> Оценка массива горных пород как конструктивного элемента горного сооружения	142
<i>Барыкина О.С., Зеркаль О.В., Андреева Т.В., Гвоздева И.П.</i> Роль песчаных толщ в развитии деформаций на склоне Воробьевых гор в Москве	148
<i>Быкова А.В., Абатурова И.В.</i> Исследование динамики температур грунтового массива на участках развития овражной термоэрозии в ПТС криолитозоны	154
<i>Гридневский А.В.</i> Историко-геологические аспекты неотектонических процессов на территории г.Ростов-на-Дону	159
<i>Дробинина Е.В.</i> Особенности свойств коренных отложений в обстановках развития карбонатно-сульфатного карста	169
<i>Зеркаль О.В., Самарин Е.Н., Чернов М.С., Аверин И.В., Новиков П.В.</i> Изменение состава и строения юрских глин в зоне оползневых смещений на участке «Воробьевы горы» (г.Москва)	175
<i>Килин Ю.А., Минькевич И.И., Фаисханов Д.Р.</i> Обвальнo-карстовые отложения и ольховская карстовая брекчия в карстовых массивах Пермского края	182
<i>Ковалёва Т.Г., Селина З.В., Чиждова В.А., Новикова А.А.</i> Влияние глинистых отложений на активность развития карста	187
<i>Козлов В.С., Стороженко Л.А., Мазаитова Э.Д., Королева И.А.</i> Инженерно-геологическое обоснование прогноза устойчивости горных выработок на этапах поисково-разведочных работ	193
<i>Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Анисимова Н.Г.</i> Изучение закарстованности и разрушенности каменноугольного карбонатного массива на территории Москвы	199
<i>Миронюк С.Г., Ионов В.Ю.</i> Оценка сейсмической разжижаемости грунтов Баренцева моря	202
<i>Романов В.В.</i> Применение инженерной сейсморазведки при оценке карстово-суффозионной опасности на примере Московского региона	208
<i>Стром А.Л.</i> Гранулометрический состав и строение отложений каменных лавин – ключ к пониманию механизма их перемещения	211
<i>Торгоев И.А.</i> Ползучесть отвалов на высокогорном руднике Кумтор	218
<i>Торгоев И.А., Алёшин Ю.Г.</i> Оползни сейсмогенного разжижения в лёссовидных суглинках	224
<i>Ухова Н.Н., Генсиоровский Ю.В., Ряценок Т.Г.</i> Особенности состава и свойств грунтов селевых отложений в зоне распространения многолетнемерзлых пород	230
<i>Хамраев Б., Лаврусевич А.А.</i> Подтопление и статические нагрузки как основные факторы изменения сейсмических свойств лессовых грунтов	235

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧЕНИЯ ГРУНТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

<i>Барановский А.Г.</i> Влияние условий проведения лабораторных испытаний элювиальных глинистых грунтов на их механические свойства	239
<i>Большаков И.Е., Житова Е.С., Нурдаев А.А.</i> Определение свойств гидротермально измененных пород с помощью молотка Шмидта (Большой Семячик, Камчатка)	244
<i>Габибов Ф.Г., Зейналов А.З.</i> Исследование устойчивости однородных глинистых склонов, нагруженных равномерно распределенными нагрузками на локальных участках	251
<i>Евенкова Т.Д., Бурлуцкий С.Б., Лаздовская М.А., Татарский А.Ю., Карам Ж.С., Хомутильников С.Н.</i> Оценка изменения свойств дисперсных грунтов под влиянием постоянных токов системы электрохимической защиты трубопроводов от коррозии	257
<i>Елохина С.Н., Зырянова Е.С., Худяков А.А.</i> Использование БПЛА при аэрофотосъемке бугров пучения на территории ЯНАО с последующей обработкой в программном обеспечении	263

<i>Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Дернова Е.О., Осокин А.А.</i> Методы исследования свойств мерзлых грунтов и прогноза их изменения	270
<i>Клокова Ю.В., Петрова И. Г., Ковязин И.Г.</i> Геоэкологическое картографирование и биоиндикация ландшафтов с применением ГИС-технологий	277
<i>Корчак С.А., Савинцев И.А., Козлов В.С., Петрова И.Г.</i> Оценка степени трещиноватости массива МПИ с использованием альтернативных методов	282
<i>Локтев А.С.</i> Современные методы исследований грунтов шельфа	286
<i>Любимова Т.В.</i> Исследование параметров деформируемости грунта при условии его насыщения керосином	291
<i>Манухин И.В.</i> Влияние циклического промерзания-оттаивания на минеральный состав, строение и свойства модельных дисперсных грунтов	295
<i>Матвеев В.В., Шанина В.В.</i> Систематизация факторов, влияющих на точность графических построений для определения напряжения предуплотнения	301
<i>Матюшенко А.А., Иванов А.А., Посеренин А.И.</i> Геофизические методы при картировании загрязнений углеводородами	309
<i>Орлов Т.В., Бондарь В.В., Архипова М.В., Шахматов К.Л.</i> Оценка обводненности торфяных грунтов осушенных болот по дистанционным данным	314
<i>Рященко Т.Г.</i> Методы литологии в региональном грунтоведении	320
<i>Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Васенин В.А.</i> О предсказательной способности моделей механики грунтов	326

5. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ МАССИВОВ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ

<i>Абдрахманов Р.Ф.</i> Защитные противодиффузионные модели основания полигона утилизации твердых промышленно-бытовых отходов	333
<i>Абрамова Т.Т.</i> Искусственное преобразование слабых грунтов	339
<i>Батракова Г.М., Слюсарь Н.Н., Тарабара А.В.</i> Результаты эколого-гигиенического обследования территорий ликвидированных шахтных пусковых установок в Пермском крае	345
<i>Галицкая И.В., Костикова И.А.</i> Изучение загрязненных грунтов как вторичного источника загрязнения на территориях размещения полигонов ТКО	348
<i>Григорьева И.Ю., Морозов А.В., Садов С.С.</i> Биодиагностика экологического состояния дисперсных грунтов	355
<i>Зуб О.Н.</i> К вопросу эколого-геологического влияния углеводородного загрязнения на свойства дисперсных грунтов	362
<i>Красовская И.А., Галкин А.Н.</i> Техногенные грунты на территории г. Витебска и геоэкологические аспекты их изучения	364
<i>Ларионова Н.А.</i> Особенности процессов твердения гидратированных зол и зологрунтовых систем	372
<i>Макаров В.Н.</i> Миграция соединений азота в мерзлых и талых грунтах городского культурного слоя	380
<i>Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т., Мещерякова О.Ю., Березина О.А., Деменев А.Д.</i> Формирование техногенных донных отложений под влиянием изливов кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна	385
<i>Мамаев Ю.А.</i> О морфологическом составе и свойствах коммунальных отходов	388
<i>Парфенова Л.П., Екимова О.А.</i> Изучение фильтрационных свойств твердых шламов накопителей при гидрогеоэкологических исследованиях	391
<i>Пеллинен В.А., Черкашина Т.Ю.</i> Оползневые смещения как механизм миграции тяжелых металлов в береговой зоне острова Ольхон, озера Байкал	394
<i>Перевозицкова А.Д.</i> Эколого-геохимическая оценка донных отложений рек Березниковского городского округа	399

<i>Помеляйко И.С.</i> Метод эколого-геохимической оценки состояния почв территории природно-технической системы	407
<i>Родькина И.А., Самарин Е.Н.</i> Влияние аутигенных пленок на поглощающую способность песчаных грунтов по отношению к свинцу	414
<i>Рыбников П.А., Рыбникова Л.С., Бузина Д.А., Смирнов А.Ю.</i> Оценка самореабилитации территории Левихинского рудника по данным индекса NDVI	422
<i>Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю., Галин А.Н.</i> Гидрогеоэкологические аспекты изучения техногенных отходов отработанного Левихинского медноколчеданного рудника (Свердловская область)	428
<i>Суханова Т.В., Макарова Н.В., Стафеев А.Н.</i> Мезо-кайнозойские отложения Зауральского пенепплена как среда захоронения опасных промышленных отходов	434
<i>Ушакова Е.С., Караваяева Т.И.</i> Особенности геоэкологического состояния почв в промышленных зонах	437
<i>Федорук Н.А.</i> Геохимическое загрязнение тяжелыми металлами грунтов правобережной части г. Дубна	444
<i>Харькина М.А., Валиева А., Туляков Е.Д.</i> Грунты как составная часть эколого-геологической системы	449
<i>Черных В.И., Жолудева И.Д.</i> Формирование микроэлементного профиля дерново-литогенных почв в техногенных ландшафтах Донбасса	453
<i>Указатель авторов</i>	458