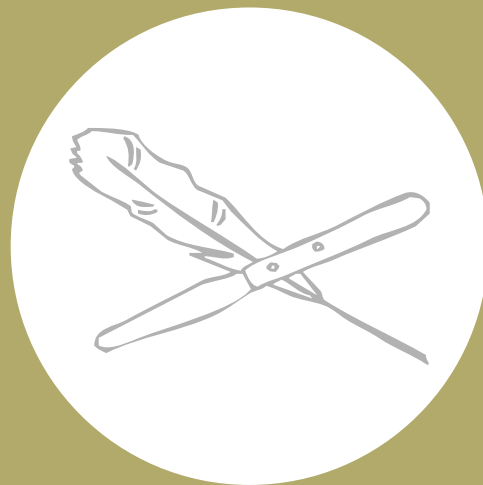


# ГРУНТОВЕДЕНИЕ

---

№ 2(21)  
2023





*Охотинское общество грунтоведов*

# ГРУНТОВЕДЕНИЕ

**Gruntovedenie**

---

№ 2(21)  
2023

Журнал основан в 2012 г.

*Главный редактор*

Е. А. Вознесенский

*Редакционная коллегия:*

Е. А. Вознесенский, А. А. Лаврусевич, В. А. Королев, Б. Ф. Апарин, Г. Г. Болдырев,  
Л. П. Норова, А. В. Русаков, А. А. Свертилов, Л. К. Семенова, Л. А. Строкова,  
Н. С. Никифорова, А. И. Попов, Г. П. Постоев, С. В. Сольский

*Зав. редакцией Ю. Ю. Соколова*

*Адрес редакции:* 199034, Санкт-Петербург, 7-ая линия ВО, д. 2/1

тел.: +7 921 986 51 06

[www.okhotin-grunt.ru](http://www.okhotin-grunt.ru)

*E-mail:* [gruntovedenie@mail.ru](mailto:gruntovedenie@mail.ru)

[okhotin-grunt@mail.ru](mailto:okhotin-grunt@mail.ru)

**Санкт-Петербург**

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ГРУНТОВЕДЕНИЕ

*Ф. С. Карпенко*

**СВОЙСТВА ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ С ПОЗИЦИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ  
ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ**

3

*Г. С. Аманова, Е. А. Вознесенский*

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ  
НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТОВ**

13

### МЕХАНИКА ГРУНТОВ

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

**ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ОСАДКОВ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ**

29

### ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ ГРУНТОВЕДЕНИЕ

*Ю.В. Фролова, О.В. Зеркаль, И.Е. Большаков*

**ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОРОД КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ  
ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РАЙОНАХ КУРИЛО-  
КАМЧАТСКОЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ДУГИ**

36

### ВОПРОСЫ ГРУНТОВЕДЕНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПОЧВ

*А. И. Попов, К. И. Цивка, Е. В. Сазанова, Г. Д. Холостов, О. Т. Жилкибаев,  
Е.П. Шалунова, А.А. Леонтьев, В. П. Борисова, Ю. В. Симонова, О. В. Романов,  
А. К. Ошмарина, А. А. Кызин*

**К ВОПРОСУ О КАЧЕСТВЕННОМ СОСТАВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА  
ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

44

### ЮБИЛЕИ

*Е. П. Каюкова*

**100 ЛЕТ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ШКОЛЫ ГРУНТОВЕДЕНИЯ**

53

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

62

DOI 10.53278/2306-9139-2023-2-21-3-12  
УДК 624.131.4

## СВОЙСТВА ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ С ПОЗИЦИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ

### CLAYEY SOILS PROPERTIES ON THE PHYSICOCHEMICAL THEORY OF STRENGTH POSITIONS

© 2023 г. Ф. С. Карпенко

© 2023 F. S. Karpenko

*Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000, Россия*  
*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science, Ulanskii per. 13, bld. 2,*  
*Moscow, 101000, Russia*

kafs08@bk.ru

**Аннотация:** С позиций физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах рассматриваются научно-методические вопросы изучения глинистых грунтов, определения их механических свойств. Показано, что именно величина сил взаимодействия между частицами глинистых грунтов определяет их строение, свойства и характер деформирования в различных условиях воздействия внешних нагрузок. Рассмотрена практическая методика изучения глинистых грунтов, позволяющая определять величину внутренних напряжений, действующих в самом грунте между его компонентами.

**Abstract:** scientific and methodological issues of studying clayey soils and determining their mechanical properties are considered on the standpoint of the physicochemical theory of effective stresses in soils. The modern theoretical base of research assumes estimate only the effect of external loads on the soil and their relationship but does not consider its internal structure. It is shown that the value of the forces of interaction between the particles of clayey soils determines their structure, properties, and character of the deformations under various conditions of external loads. A practical method of clayey soils studying is considered. This methodology makes it possible to determine the value of internal stresses between the mineral particles of the clayey soils.

**Ключевые слова:** глинистые грунты, структурные контакты, количество контактов, гидратные пленки, общие эффективные напряжения, реальные эффективные напряжения, реальная эффективная прочность, реальная эффективная деформируемость.

**Keywords:** clayey soils, structural contacts, number of contacts, hydrate films, total effective stresses, real effective stresses, real effective strength, real effective deformability.

#### Введение

Глинистые грунты наиболее широко распространены среди всех осадочных пород земной коры, чаще других 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 отечественной и зарубежной практике грунтоведения определение свойств глинистых грунтов проводится по аналогичным методикам испытаний, закрепленным ведущими нормативными документами. В основе этих общепринятых методик

положены фундаментальные положения классической механики сплошных сред — теории трения, пластичности и упругости.

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, 17 и др.]. 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. 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.

Основная причина возникающих противоречий заключается в том, что с позиций современной научно-методической базы исследований глинистые грунты рассматриваются как сплошные упругие тела, но при этом реальное строение глин значительно более сложное. Важной особенностью глин является то, что в их составе, наряду с песчаными и пылеватыми частицами, присутствуют минеральные частицы глинистых минералов, что является важнейшим фактором, определяющим их строение и обуславливающим свойства. Глинистые частицы взаимодействуют между собой и с содержащейся в грунте водой, а под влиянием внешних воздействий, в первую очередь нагрузки, параметры этого взаимодействия могут изменяться, определяя реакцию глин их действие. Именно это в значительной степени и обуславливает возникающие при практических исследованиях глинистых грунтов противоречия. В то же время существующая в настоящее время методическая и техническая база испытаний грунтов не дает возможности определения внутренних напряжений в них и оценки их изменения в различном напряженном состоянии, поэтому этот важнейший фактор в практических исследованиях не может учитываться.

Все это формирует предпосылки для разработки нового научно-методического направления изучения глинистых грунтов, при котором должны рассматриваться не только величины внешних нагрузок на грунт и их соотношение, но и оцениваться внутренние напряжения, действующие в самом грунте между основными его компонентами, определяющими строение и свойства — частицами глинистых минералов и водой. Возможность разработки такого подхода дают современные научные представления об условиях образования глин, закономерностях формирования и изменения их строения и свойств, сформулированные в положениях физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах. Рассмотрение возможности практического проведения таких исследований является основной целью настоящей работы.

### Теоретический анализ состояния вопроса

В основе современных научных представлений о строении глин лежит рассмотрение их как дисперсные системы, сложенные минеральными частицами глинистых минералов дисперсной фазы и водой, слагающей дисперсионную среду. Эти представления базируются на положениях фундаментальных теорий ДЛФО (сокращ. от теории Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека), двойного электрического слоя (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 [12–14] 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, приводящего к формированию структурных контактов между минеральными частицами и их трансформации в процессе литогенеза. Для дисперсных глинистых грунтов В.И. Осиповым [11] было выделено 3 основных типа структурных контактов — дальний коагуляционный, ближний коагуляционный и переходный точечный. Коагуляционные контакты возникают в тонкодисперсных водонасыщенных грунтах за счет дальнедействующих молекулярных и электростатических взаимодействий. Действующие на таких контактах силы превышают вес частиц, поэтому грунты с коагуляционными контактами ведут себя как связные системы. Характерной особенностью коагуляционных контактов является то, что частицы не взаимодействуют непосредственно между собой, между ними имеется тонкая равновесная прослойка связанной воды. При дальнейшем сближении частиц может происходить прорыв гидратной пленки и образование непосредственного контакта между ними. При этом формируются контакты переходного типа, в основе которых лежат силы ионно-электростатического взаимодействия. Особенностью контактов в глинах является их метастабильность и способность переходить при определенных условиях в коагуляционные или фазовые.

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 энер-

гетического взаимодействия имеет два потенциальных минимума, отвечающих наиболее устойчивому энергетически выгодному состоянию системы и разделенных энергетическим максимумом. 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 [13] были введены понятия реальной и общей эффективной прочности. Реальная эффективная прочность характеризует силу взаимодействия между частицами и определяется как величина реального эффективного напряжения  $\sigma$  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  $\sigma$ , 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 потенци-

ального минимума. При приложении нагрузки на структурные контакты энергетическое положение системы начинает изменяться и, в зависимости от величины нагрузки, система может оставаться в зоне преобладания сил притяжения между частицами либо перемещаться в зону преобладания сил отталкивания (рис. 1). 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 упругой деформируемости и характеризует предел внешних нагрузок, при которых определяются деформационные свойства грунтов. Аналогично реальной эффективной прочности этот уровень напряжений может быть назван реальной эффективной деформируемостью.

#### Методика и результаты исследования

Современная приборная база грунтоведческих исследований не дает возможности непосредственного измерения напряжений на контактах глинистых грунтов. Оценка напряжений, возникающих на контактах при их разрушении, может быть дана в таком случае только расчетным путем по резуль-

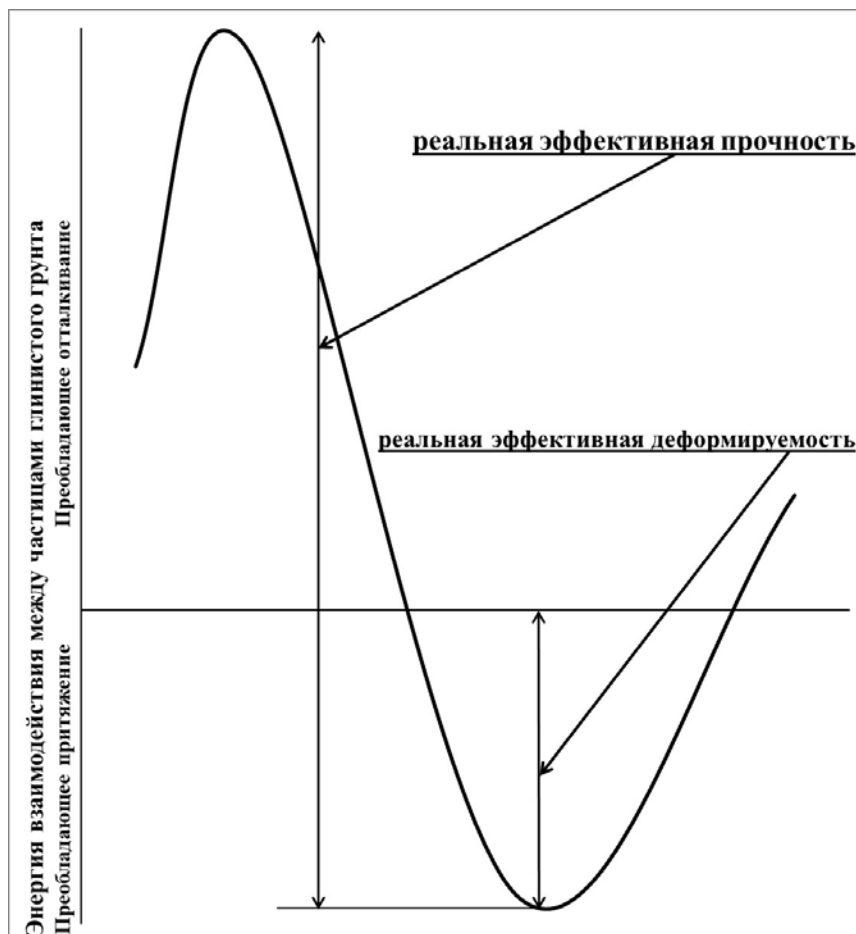


Рис. 1 — Определение реальной эффективной прочности и реальной эффективной деформируемости глин

татам определения общей эффективной прочности грунта и величины расклинивающего давления гидратных пленок.

Величина общей эффективной прочности глинистого грунта  $\sigma'$  может быть определена экспериментально [6] как суммарная величина внешних напряжений, действующих на грунт, за вычетом величины порового давления (по К. Терцаги) при разрушении контактов между глинистыми частицами. Результаты исследований (рис. 2), выполненных для различных разновидностей глинистых моренных грунтов Московского региона (gIIms), показывают, что значение  $\sigma'$  закономерно снижается в ряду тяжелые глины — легкие глины — тяжелые суглинки — легкие суглинки — супеси и также снижается по мере увеличения влаги в грунте. Важным условием испытаний являлось то, что они проводились на полностью водонасыщенных грунтах, что исключало действие в них капиллярных сил. Это свидетельствует о том, что величина общей эффективной прочности зависит от минералогического состава грунта, количества глинистых частиц, следовательно, и контактов между ними, а также толщины гидратных пленок частиц. На двух участках, соответствующих влажностям грунтов равным

пределу пластичности  $W_P$  и пределу текучести  $W_L$ , происходит резкое скачкообразное изменение величины  $\sigma'$ . 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, а именно, дальнего коагуляционного, ближнего коагуляционного и переходного точечного.

Величина общего эффективного напряжения  $\sigma'$  в условиях полного водонасыщения грунта, при которых не действуют капиллярные силы, определяется как результат совместного действия сил притяжения и отталкивания между минеральными частицами (реального эффективного напряжения  $\sigma''$ ) на контактах и расклинивающего действия гидратных пленок  $\Pi(h)$ . Соответственно, для определения величины  $\sigma'$ , которая и определяет собственно прочность самого контакта (его реальную эффективную прочность), из полученных значений  $\sigma'$  должна быть вычтена величина расклинивающего давления гидратных пленок частиц.

Расклинивающее давление гидратных пленок  $\Pi(h)$  проявляется в набухании глинистых грун-

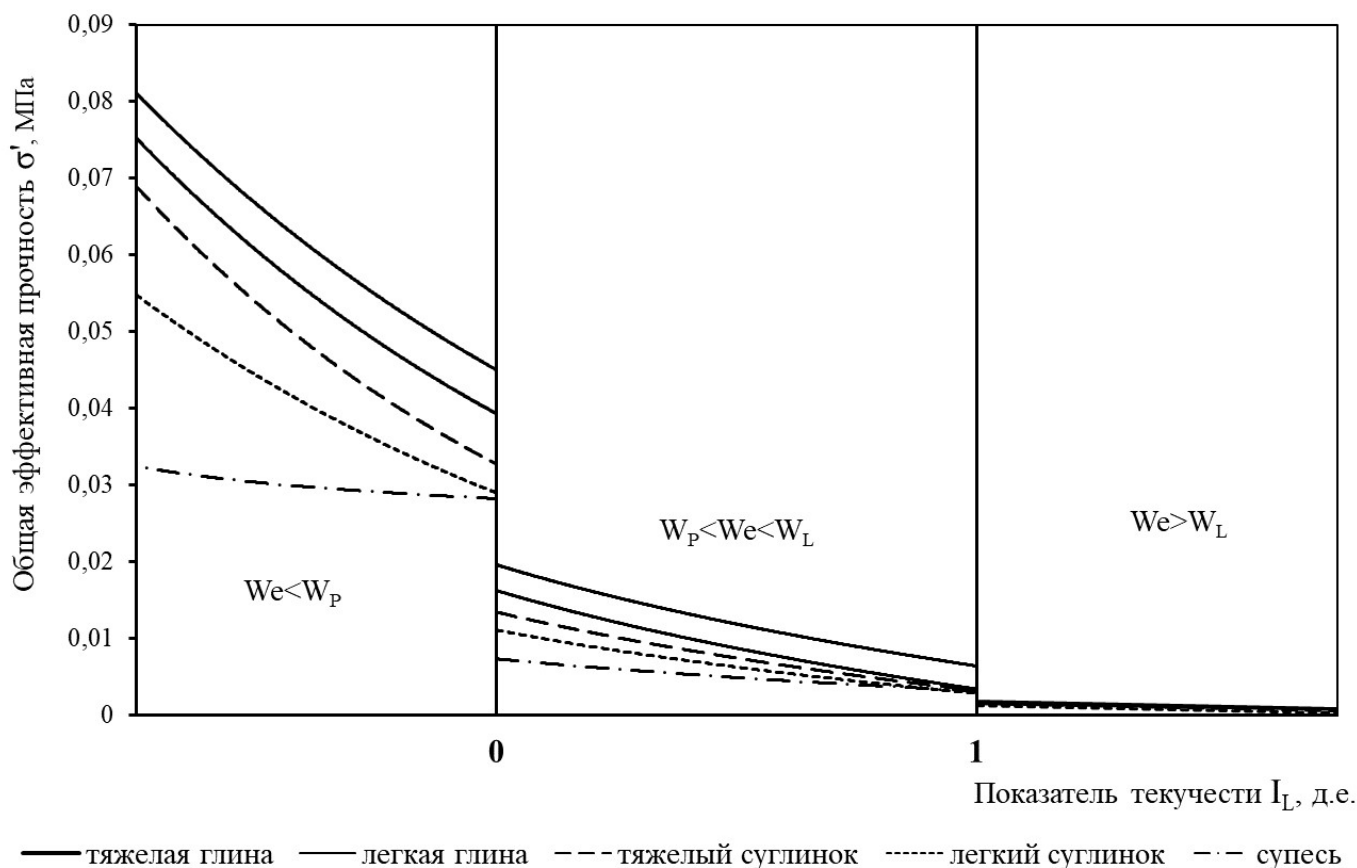


Рис. 2. Зависимость общей эффективной прочности  $\sigma'$  глинистых грунтов от содержания в них влаги



тов при гидратации. Развивающееся в этом случае избыточное давление одновременно воздействует на свободную воду, что приводит к повышению порового давления в грунте, и на контакты, нарушая энергетическое равновесие на них. Энергетическое равновесие на контактах в естественных условиях определяется компенсированным взаимодействием сил притяжения и отталкивания между минеральными частицами и расклинивающего действия гидратных пленок. При превышении давления гидратных пленок на контактах внешнего напряжения в грунте начинает развиваться процесс набухания. Вопрос определения величины расклинивающего действия пленок  $\Pi(h)$  при набухании грунтов был рассмотрен автором с соавторами ранее [5]. Было показано, что расклинивающее давление пленок определяет величину давления набухания, и по результатам практических экспериментальных исследований были получены его численные характеристики и описаны закономерности изменения при изменении содержания влаги в грунте (рис. 3).

Закономерность изменения реальной эффективной прочности (рис. 4) и реальной эффективной деформируемости (рис. 5), определенная для раз-

новидностей глинистых моренных грунтов каолинит-иллитового и тяжелых мономинеральных глин сапонитового, монтмориллонитового и каолинитового состава, носит характер, аналогичный общей эффективной прочности [7, 8].

Полученные данные позволили, опираясь на результаты экспериментальных исследований, проведенных В.Н. Соколовым [15, 16], определить количество индивидуальных контактов (табл. 1) и величину их реальной эффективной прочности и деформируемости (табл. 2) для разновидностей глинистых грунтов [6, 7]. Эти данные были подтверждены результатами исследования образцов глин методом компьютерной рентгеновской томографии (X-ray mCT), выполненных в Почвенном институте им. В.В. Докучаева РАН на рентгеновском микротомографе SkyScan 1172G [9]. Полученные результаты, конечно, требуют своего дальнейшего изучения и уточнения, но и в данном виде могут быть применены в качестве предварительных ориентировочных при практических исследованиях строения и свойств глин.

Данные, приведенные в таблицах 1 и 2, характеризуют предельные значения реальных эффективных напряжений  $\sigma$  на контактах глинистых

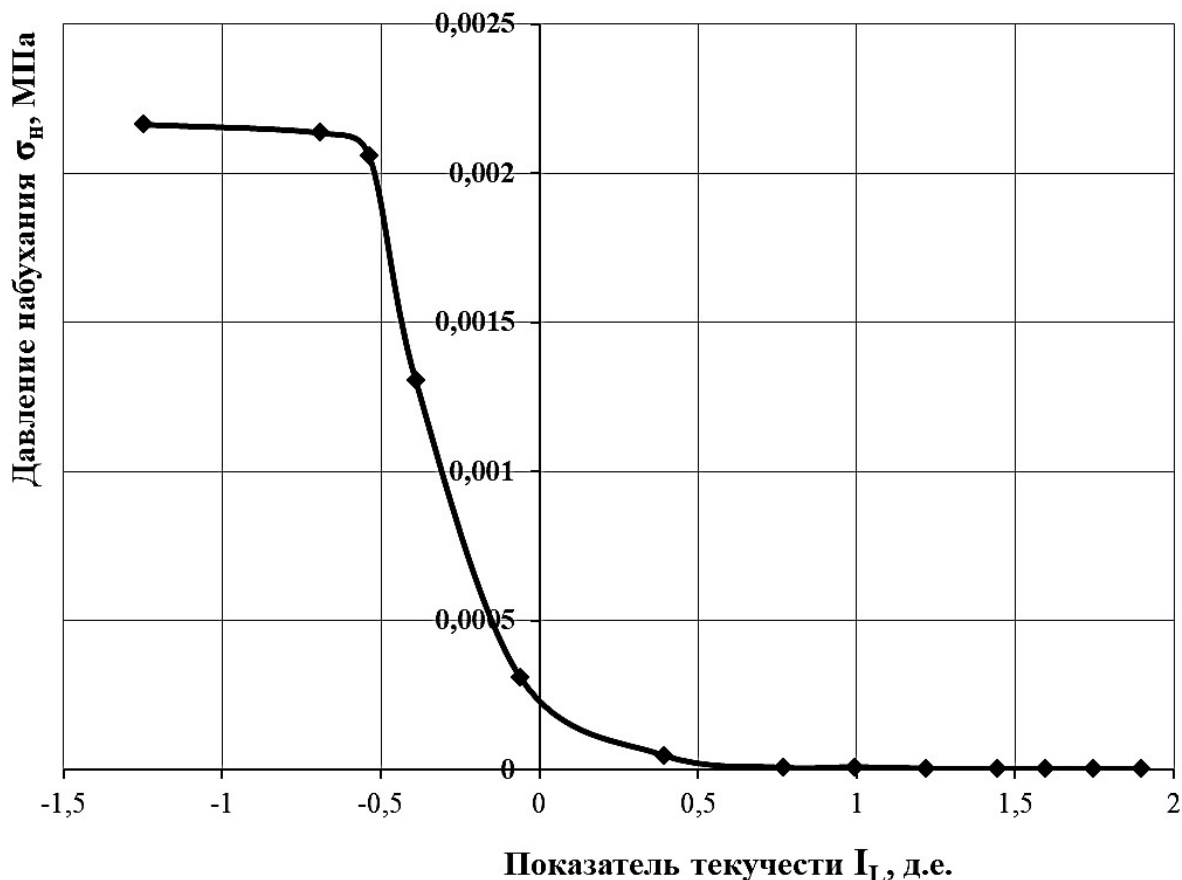


Рис. 3. Характерный график зависимости расклинивающего давления гидратных пленок в глинистых грунтах от содержания влаги

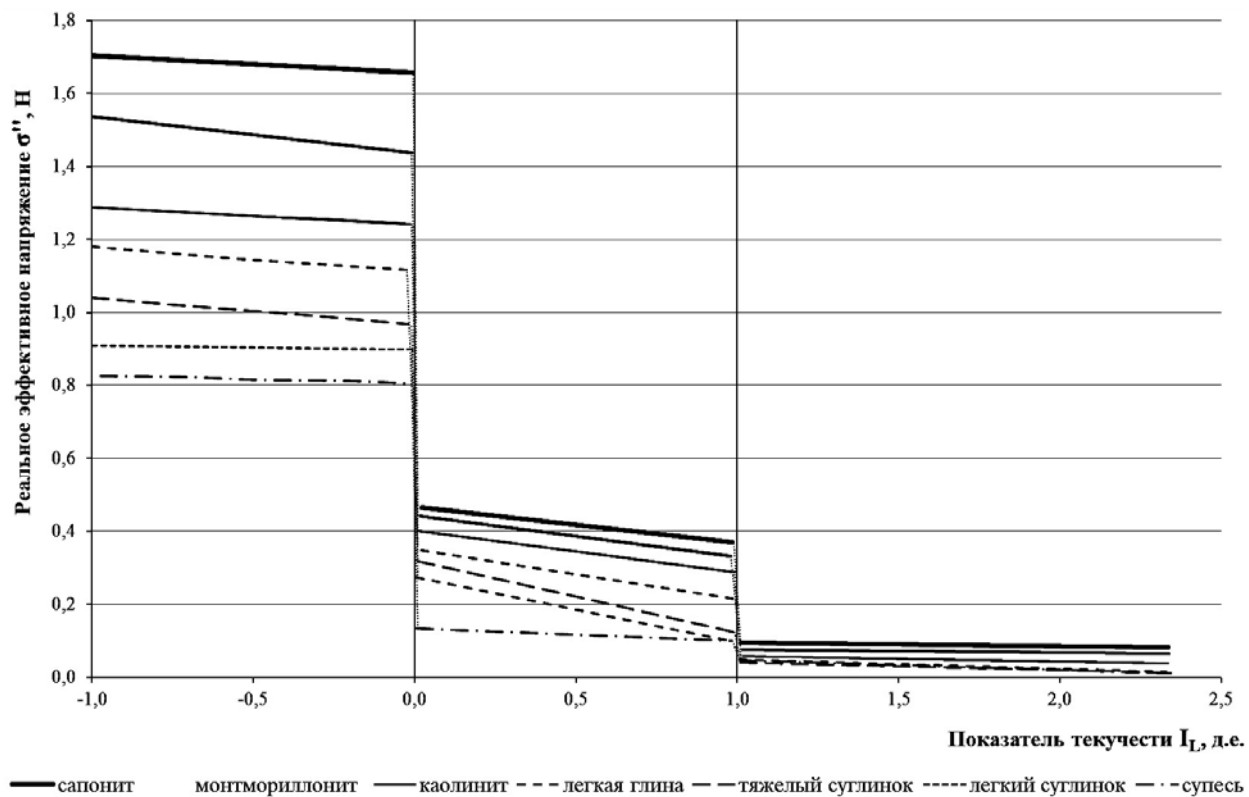


Рис. 4 — Зависимость реальной эффективной прочности (реальное эффективное напряжения  $\sigma'$  в единичном объеме) глинистых грунтов от содержания в них влаги

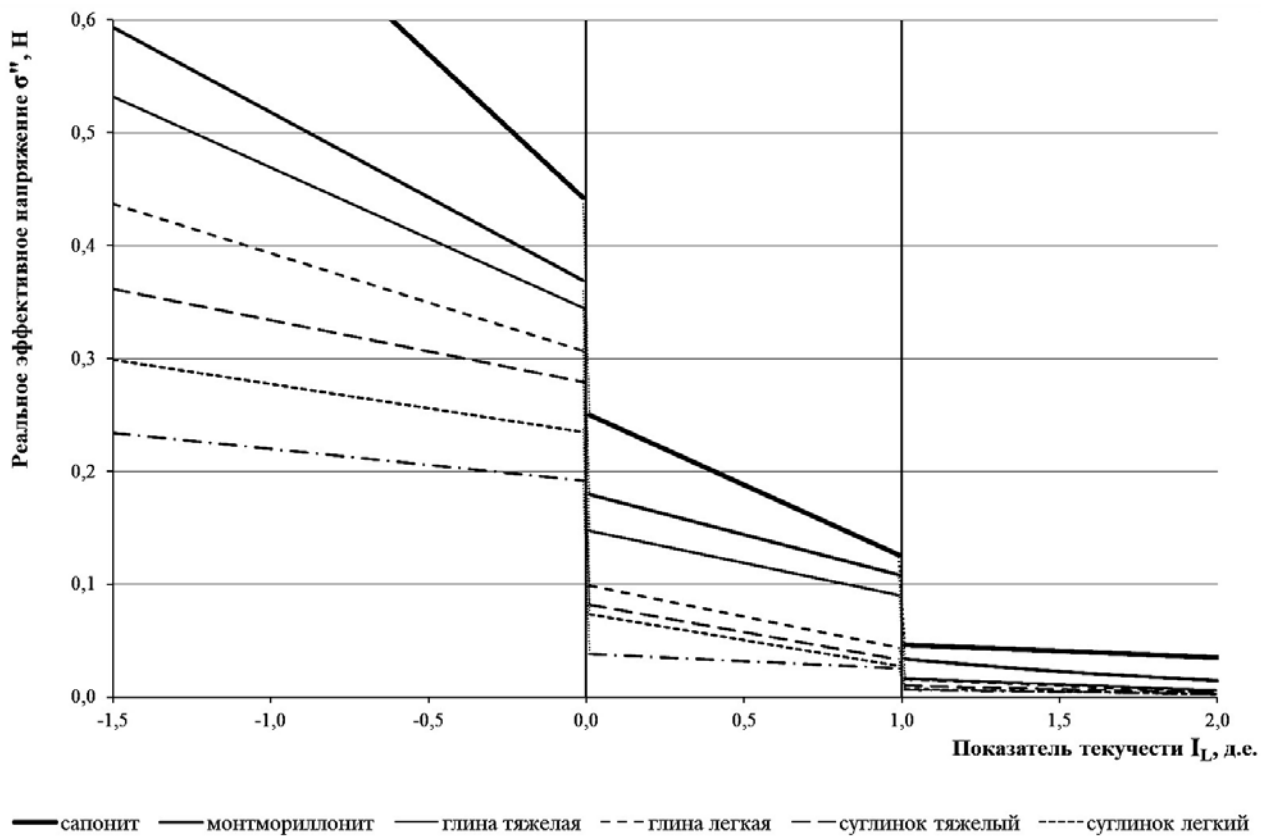


Рис. 5 — Зависимость реальной эффективной деформируемости (реальное эффективное напряжения  $\sigma'$  в единичном объеме) глинистых грунтов от содержания в них влаги

грунтов, определяющие их строение и характер деформирования в различных условиях напряженного состояния. Для каждой разновидности глинистого грунта, в зависимости от преобладающего типа контактных взаимодействий в нем, могут быть определены три уровня напряжений (рис. 6), 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 условию Мора–Кулона.

В условиях нагружения, при которых величина реального эффективного напряжения не превышает реальную эффективную деформируемость (линия 1 на рис. 6), 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 уровня внешней нагрузки выше реальной эффективной деформируемости дисперсная глинистая система перемещается в зону преобладающего действия сил отталкивания на контактах. Действие сил отталкивания способствует перемещению и переориентации частиц и при достижении реальным эффективным напря-

жением величины реальной эффективной прочности (линия 2 на рис. 6) происходит разрушение контактов.

Линия 3 на рисунке 6 соответствует величине прочности грунта, определенной в соответствии с условием Мора–Кулона, то есть уровню предельных нагрузок на грунт, при которых происходит его физическое разрушение как сплошного тела.

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 граничными уровнями напряжений.

В условиях нагружения, при которых величина внешнего напряжения не превышает уровень реальной эффективной деформируемости глинистого грунта, 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

**Таблица 1. Число контактов различного типа в разновидностях глинистых грунтов**

Разновидность грунта по числу пластичности	Число контактов в элементарном объеме грунта (1 см <sup>3</sup> ) с преобладающим типом контактов		
	переходным точечным	ближним коагуляционным	дальним коагуляционным
глина тяжелая	3,0*10 <sup>08</sup> –3,2*10 <sup>08</sup>	2,7*10 <sup>08</sup> –3,0*10 <sup>08</sup>	2,4*10 <sup>08</sup> –2,6*10 <sup>08</sup>
глина легкая	2,7*10 <sup>08</sup> –2,9*10 <sup>08</sup>	2,5*10 <sup>08</sup> –2,7*10 <sup>08</sup>	2,2*10 <sup>08</sup> –2,4*10 <sup>08</sup>
суглинок тяжелый	2,4*10 <sup>08</sup> –2,7*10 <sup>08</sup>	2,2*10 <sup>08</sup> –2,5*10 <sup>08</sup>	1,9*10 <sup>08</sup> –2,2*10 <sup>08</sup>
суглинок легкий	2,1*10 <sup>08</sup> –2,5*10 <sup>08</sup>	1,9*10 <sup>08</sup> –2,3*10 <sup>08</sup>	1,7*10 <sup>08</sup> –2,0*10 <sup>08</sup>
супесь	1,9*10 <sup>08</sup> –2,1*10 <sup>08</sup>	1,7*10 <sup>08</sup> –2,0*10 <sup>08</sup>	1,5*10 <sup>08</sup> –1,7*10 <sup>08</sup>

**Таблица 2. 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			

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 также стремятся вернуть грунт в исходное состояние. В этом случае, в зависимости от соотношения реальной эффективной прочности грунта и величины реальных эффективных напряжений (т.е. величины внешней нагрузки), возможна либо стабилизация деформаций, либо ее уменьшение, что соответствует условиям проявления установившейся и затухающей ползучести грунта.

При увеличении уровня внешней нагрузки выше реальной эффективной деформируемости

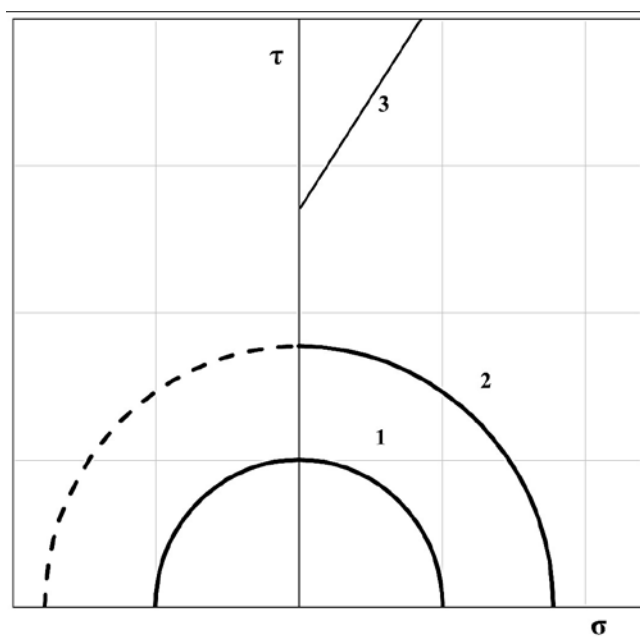


Рис. 6 — Уровень напряжений в глинистых грунтах: 1 — реальная эффективная деформируемость; 2 — реальная эффективная прочность; 3 — предельное напряжение по закону Мора–Кулона

в глинистой дисперсной системе начинают преобладать силы отталкивания между частицами, действующие однонаправленно с внешней нагрузкой. В этих условиях деформирование происходит за счет совместного влияния внешней нагрузки 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 и достижении реальным эффективным напряжением уровня реальной эффективной прочности происходит разрушение контактов в грунте.

Важной особенностью структурных контактов дисперсных глинистых грунтов является обратимость [11], 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 напряжений на структурных контактах глинистых минеральных частиц, соответствуют условиям максимальной нагрузки, при которой возможно определять прочность грунта, теории естественной прочности И.П. Иванова [4]. В соответствии с ней собственная реакция глинистого грунта на внешние воздействия имеет место в определенном индивидуальном интервале нагрузок, зависящем от его влажностного состояния.

Под действием сжимающих нагрузок происходит сближение частиц грунта и, в конечном итоге, образование новых более прочных контактов, а также переход 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. 3).

В условиях приложения нагрузок, направленных на отдаление друг от друга частиц грунта, увеличение расстояния между ними, увеличение толщины гидратных пленок, трансформация контактов может протекать в обратном направлении: после разрушения под действием нагрузки будут формироваться менее устойчивые контакты. Таким условиям воздействия отвечает противодействие, приводящее к разуплотнению грунта, снижению его плотности, повышению влажности и показателя текучести, ослаблению прочностных и деформационных свойств (табл. 4).

Приведенные выше данные, полученные на основании выполненных экспериментальных исследований, были также подтверждены результатами компьютерной рентгеновской томографии, позволяющей получать томографические проекции глинистых грунтов и рассчитывать морфометрические параметры их внутренней структуры [10].

**Таблица 3. Изменение свойств глинистого грунта при действии сжимающей нагрузки**

исходный естественный грунт					грунт после воздействия нагрузки				
Влажность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Показатель текучести, д.е.	Реальные эффективные напряжения в единичном объеме, Н		Влажность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	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 4. Изменение свойств глинистого грунта при действии противодавления**

исходный естественный грунт					грунт после воздействия нагрузки				
Влажность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Показатель текучести, д.е.	Реальные эффективные напряжения в единичном объеме, Н		Влажность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	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

**Выводы**

Глинистые грунты проявляют ряд специфических свойств, отличающих их от других грунтов, и характер их деформирования под действием внешних нагрузок во многих случаях противоречит теоретическим положениям механики грунтов. В значительной степени это связано со строением глин, важнейшую роль в котором играют входящие в их состав частицы глинистых минералов, взаимодействующие между собой и с водой в грунте и образующие дисперсную систему, дисперсная фаза которой слагается глинистыми частицами, а дисперсионная среда связной водой, формирующей гидратные пленки частиц.

Дисперсные глинистые системы являются чувствительными 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 как внешними факторами: видом напряженного состояния, интенсивностью и видом нагрузок, так и внутренними — преобладающим типом контактов минеральных частиц, их количе-

ством и минеральным составом, толщиной 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, а также уровня общих и реальных напряжений на структурных контактах.

Описанный 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 и обосновать прогноз их изменения в результате различных воздействий, основанный на оценке реакции грунта на такие воздействия. Использование 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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

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., Кутергин В. Н., Кальбергенов Р. Г. Влияние расклинивающего действия гидратных пленок на прочностные свойства глинистых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2018, № 4, С. 91–97.
6. Карпенко Ф. С. Физико-химическая природа пределов пластичности глинистых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2018, № 5, С. 66–72.
7. Карпенко Ф. С. Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2019, № 5, С. 48–60.
8. Карпенко Ф. С. Физико-химическая природа деформируемости глинистых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2020, № 6, С. 63–73.
9. Карпенко Ф. С., Абросимов К. Н., Сереброва О. В. Вопросы определения числа структурных контактов в глинистых дисперсных грунтах // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2021. № 5. С. 60–71.
10. Карпенко Ф. С. Характер деформирования глинистых грунтов с позиций физико-химической теории эффективных напряжений // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2022. № 6. С. 66–75.
11. Осипов В. И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
12. Осипов В. И., Соколов В. Н., Румянцева Н. А. Микроструктура глинистых пород / Под ред. Е. М. Сергеева. М.: Недра, 1989, 210 с.
13. Осипов В. И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИГЭ РАН, 2012, 74 с.
14. Осипов В. И., Соколов В. Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013, 576 с.
15. Соколов В. Н. Физико-химические аспекты механического поведения глинистых грунтов // Инженерная геология, 1985, № 4, С. 18–41.
16. Соколов В. Н. Модели микроструктур глинистых грунтов // Инженерная геология, 1991, № 6, С. 32–40.
17. 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.

DOI 10.53278/2306-9139-2023-2-21-13-28  
УДК 624.131.4

## ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТОВ

### ENGINEERING-GEOLOGICAL MODELING OF THE SPATIAL HETEROGENEITY OF SOILS

© 2023 г. Г. С. Аманова<sup>1</sup>, Е. А. Вознесенский<sup>2</sup>

© 2023 G. S. Amanova, E. A. Voznesensky

<sup>1,2</sup>Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева (ИГЭ РАН), Уланский пер. д. 13 стр.2, Москва, 101000, Россия

<sup>1,2</sup>Sergeev Institute of Environmental Geoscience (IEG RAS), 13 bld 2 Ulansky lane, Moscow, 101000, Russia

<sup>1,2</sup>Геологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы д.1, Москва, 119234, Россия

<sup>1,2</sup>Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia

131597tupac@mail.ru<sup>1</sup>, eugene@geoenv.ru<sup>2</sup>

**Аннотация:** В статье рассматривается проблема неоднородности свойств грунтов в массиве и возможные пути оценки закономерностей ее проявления с помощью трехмерного численного моделирования пространственных полей исследуемых показателей в рамках геостатистического подхода. Анализируются результаты такого моделирования на примере достаточно пестрого по составу и строению массива грунтов. Показано, что структура полей геологических параметров а) различается для разных геолого-генетических комплексов горных пород, б) может быть проще, чем субъективно выделяемая комбинация инженерно-геологических элементов, в) предложенный подход способен выявлять и объяснять присутствующие в любых геологических подразделениях разреза значимые отклонения от нормального или логнормального распределения в его верхнем и нижнем квартилях. Эти всплески в области максимальных и минимальных значений сами по себе — дополнительная характеристика неоднородности грунтов, они свидетельствуют о не случайности, типичности таких «выбросов», которые целесообразно учитывать, а не отбраковывать из-за малости выборки. Такой анализ неоднородности позволяет увидеть общую картину строения массива и особенно полезен при пестром строении иа чередовании разновидностей грунтов, затрудняющих расчленение разреза. Он также позволяет получить дополнительную полезную информацию и о потенциальной возможности развития в них неблагоприятных геологических процессов, например, выявить в разрезе массива суффозионно-неустойчивые разности песков.

**Synopsis:** The article discusses the problem of soil properties heterogeneity in the massif and possible ways of estimating the regularities of its manifestation by means of three-dimensional numerical modeling of spatial fields of the studied parameters within the framework of geostatistical approach are considered. The results of such modeling are analyzed on the example of a fairly diverse in composition and structure soil massif. It is demonstrated that the structure of geological parameter fields a) differs for different stratigraphic-genetic complexes of soils and rocks, b) can be simpler than the combination of engineering-geological units, c) the proposed approach is able to identify and explain significant deviations from the normal or lognormal distribution in its upper and lower quartiles, present practically in any geological subdivisions of the section. These outbursts in the maximum and minimum ranges are themselves an additional characteristic of soil heterogeneity; they testify to the non-randomness of such “outbursts”, their typicality, which should be taken into account, but they are usually rejected in standard statistical processing due to the smallness of data samples. Such analysis of heterogeneity allows us to see the general picture of the structure of the massif or its part and can be especially useful in case of mottled structure and frequent alternation of soil varieties, which complicates detailed division of the profile. It also provides additional useful information about the potential for the development of unfavorable geological processes in them, for example, to identify suffusion-unstable sand varieties in the massif profile.

**Ключевые слова:** неоднородность, изменчивость, грунты, массив, геостатистика, поле показателя, трехмерное моделирование, инженерно-геологическая модель

**Keywords:** heterogeneity, variability, soils, massif, geostatistics, parameter field, 3D modelling, engineering geological model

## 1. Введение

Неоднородность состава и свойств грунтов является их неотъемлемым качеством на любом уровне изучения — от маленького лабораторного образца до массива. Неоднородность понимается авторами как различие какой-либо рассматриваемой характеристики грунта в двух разных точках пространства. Следовательно, для исчерпывающего описания любого свойства грунта соответствующие количественные или качественные показатели должны быть определены для каждой точки исследуемого массива. Эта задача на современном уровне развития науки в общем виде неразрешима, что порождает в инженерной геологии проблему пространственной неоднородности грунтов, преодоление которой возможно лишь через познание природы и закономерностей проявления этой неоднородности для отдельных характеристик грунтов.

В настоящее время в практической области инженерно-строительной деятельности эта проблема обходится путем упрощения реальной ситуации — заменой непрерывно пространственно-неоднородной среды ее кусочно-однородной моделью, состоящей из набора инженерно-геологических элементов (далее ИГЭ), все показатели свойств которых принимаются постоянными в их границах, причем на основании статистической обработки смехотворно малых по своему объему выборки фактических данных. Этот подход был разработан в 60-х годах прошлого века для возможностей ручного счета и, по существу, до сих пор не поменялся. Сами границы ИГЭ также проводятся субъективно либо геологом, либо — еще более упрощенно — специализированной программой по данным, заложенным тем же геологом, что не меняет ситуацию принципиально. Таким образом, в межскважинном пространстве положение границ ИГЭ остается неопределенным.

При этом многие из выделяемых границ этих самых ИГЭ отнюдь не являются однозначными и четкими в геологическом пространстве — напротив, часто это границы диффузные по своей природе, означающие постепенные изменения какого-либо качества грунта, и только наша субъективная схема деления массива на ИГЭ делает их некими однозначными линиями на разрезе или карте. Между тем, современный методический и математический уровень геологического и инже-

нерно-геологического численного моделирования уже может предоставить достаточно продвинутые инструменты для изучения самой пространственной неоднородности грунтов, что позволяет приступить к поискам решения этой актуальной задачи инженерной геологии.

Описание свойств геологических тел, как отмечал Г. К. Бондарик [1], реализуемо, если имеется информация о признаках (или параметрах), отражающих эти свойства, полученные для некоторого числа точек рассматриваемого тела, распределенных более или менее равномерно по его объёму. Пространственная структура свойства геологического тела базируется на понятии поля геологического параметра — количественной меры любого качества или набора качеств какого угодно компонента литосферы (ее части — геологического тела), отражающего вероятность или меру отношений качеств, характеризующих структуру геологического тела, который является или результатом непосредственного измерения свойств литосферы, или итогом некоторой процедуры преобразования численной или не численной информации.

Геологическая история каждого конкретного массива грунтов настолько своеобразна, а значение различных этапов этой истории в формировании физических свойств грунтов обычно настолько плохо известно, что рассмотреть эту проблему «в целом» чрезвычайно трудно. Все стадии петрогенеза, представляют собой характерную реакцию грунтов как системы на изменение внешних условий (давления, температуры, химизма вмещающей породы) и включают процессы физико-химического и механического уравнивания многокомпонентной системы грунтов в постоянно меняющихся внешних условиях. Любое изменение условий существования грунтов так или иначе сказывается на их составе и строении.

Неоднородность грунтов является важным фактором, который необходимо учитывать не только при проведении изысканий и изучении их свойств, но и при расчете естественных оснований проектируемых инженерных сооружений. При этом на работу естественного основания могут оказать существенное воздействие такие элементы неоднородности, которые находятся в определенных масштабных соотношениях с размерами этого основания. Влияние неоднородности зависит не только



от соотношения размеров области воздействия и величины сооружения, но и от напряженного состояния массивов грунтов, типа и конструкции сооружения и ряда других факторов.

Под изменчивостью состава и свойств грунтов, вслед за И. С. Комаровым [4], авторами здесь понимается их пространственная неоднородность, которая может быть сведена к одному из трёх типов: скачкообразной незакономерной, скачкообразной закономерной и функциональной изменчивости (рис. 1). Г. К. Бондарик на основании вероятностной природы характеристик состава и свойств грунтов для выделенных Н.В. Коломенским типов изменчивости предлагал использовать термины, применяемые в теории случайных функций. Так, скачкообразную незакономерную изменчивость он называл стационарной, скачкообразную закономерную изменчивость — нестационарной, а функциональную изменчивость — квазифункциональной.

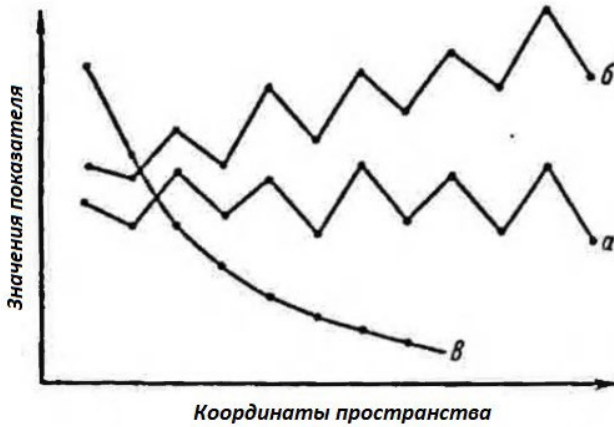


Рис. 1. Графики, иллюстрирующие типы инженерно-геологической изменчивости горных пород: а — скачкообразная незакономерная; б — скачкообразная закономерная; в — функциональная (по [5])

Под скачкообразной незакономерной изменчивостью (стационарная или изменчивость по правилу «пилы» у Н. В. Коломенского) понимают такой ее тип, при котором не наблюдается закономерной связи показателя с параметрами пространства. Такой тип изменчивости свойствен наблюдается даже во внешне однородных слоях грунтов, значения показателей которых изменяются от точки к точке незакономерно, случайно (рис. 2а).

При скачкообразной закономерной изменчивости (нестационарной) наблюдается закономерная связь с параметрами пространства в виде общего тренда, которая зависит от глубины залегания или простираения грунтов (рис. 2б). Данный тип изменчивости Н.В. Коломенский [5] подразделяет на региональный и временный, зависящие от координат

пространства и обусловленные геологическими факторами. Указанное подразделение изменчивости основано на допущении, что она может быть разделена на низкочастотную составляющую — плавные колебания, связанные с координатами пространства, и высокочастотную — крайне нерегулярные изменения, носящие случайный характер и не зависящие от координат пространства.

Роль случайного компонента в изменчивости грунтов, как отмечает И.С. Комаров [4], сложилась, с одной стороны, в связи с применением в современной практике дискретной «точечной» системы опробования, а с другой — в связи с тем, что практически невозможно осуществить отбор

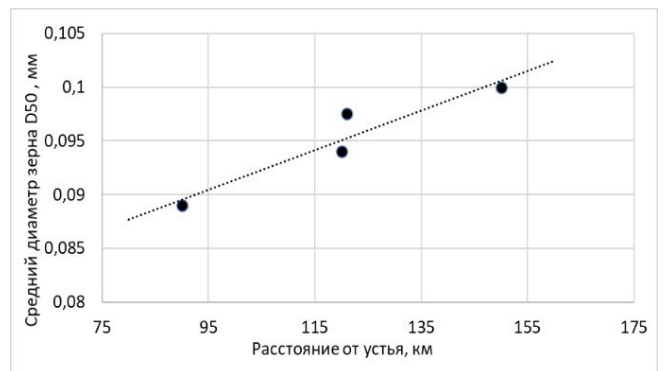
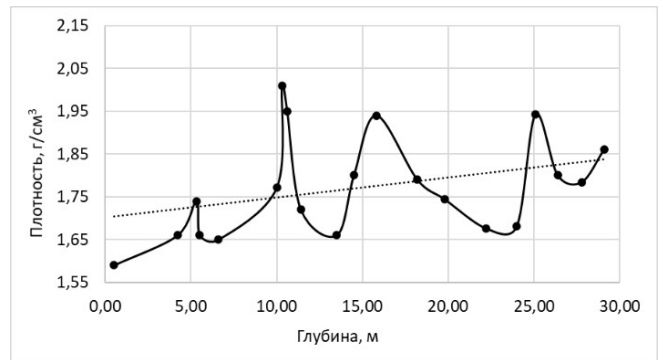
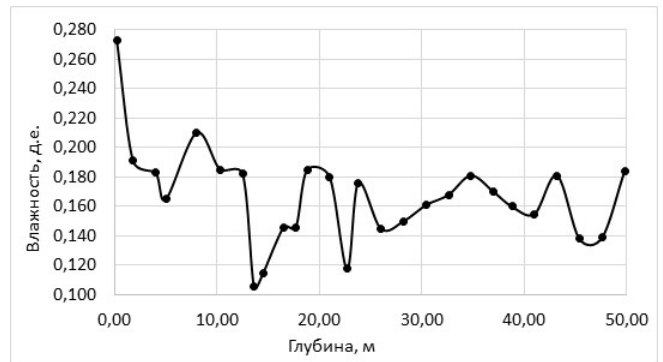


Рис. 2. Примеры разных типов инженерно-геологической изменчивости грунтов: а — скачкообразная незакономерная изменчивость влажности грунтов с глубиной; б — скачкообразная закономерная изменчивость плотности грунтов с глубиной; в — квазифункциональная изменчивость среднего размера частиц аллювия по продольному профилю реки (Б. Салым, Западная Сибирь)

образцов из одного элементарного стратиграфического слоя. При использовании точечной системы опробования и лабораторных методов изучения свойств грунтов на отдельных образцах, кажущаяся изменчивость, т. е. та картина изменчивости, которую восстанавливает исследователь с помощью выполняемого опробования, зависит не только от реальных свойств грунтов, но и в большей степени от таких факторов, как принятая величина шага опробования, число взятых образцов, их геометрия, точность лабораторных исследований и другие, и может существенно отличаться от истинной изменчивости, которой характеризуется порода.

Наряду с такой псевдослучайной изменчивостью, грунты обладают собственно случайной изменчивостью, природа которого связана с такими явлениями, как слоистость, трещиноватость, наличие зон разломов, дробления и других вариантов неоднородностей, где происходит скачкообразное изменение свойств грунтов, следовательно, и разрывы функций, описывающих закономерную пространственную изменчивость).

Наконец, возможна функциональная (квазифункциональная) изменчивость показателей свойств грунтов (рис. 2в). Согласно В. Д. Ломтадзе [6], данный тип характеризуется таким изменением свойств грунтов от точки к точке, при котором средние значения показателей располагаются по кривой, т. е. зависят от координат пространства и подчиняются более сложному закону. Это, по сути дела, нестационарный режим изменчивости с небольшим рассеянием частных значений показателя и математическим ожиданием, функционально зависящим от аргумента. Такой тип изменчивости характерен, например, для искусственно увлажненных лессовых грунтов или грунтов, подвергшихся преобразованию методами технической мелиорации.

Определение типа изменчивости показателей проводится исходя из теории случайных функций, которыми описываются распределения геологических параметров, вследствие чего изучение изменчивости осуществляется на основе следующих статистических характеристик: математического ожидания показателя, дисперсии и автокорреляционной функции. Основные законы распределения исследуемых параметров, в большинстве случаев близки к нормальному или логнормальному распределению.

Вопросы неоднородности и изменчивости свойств грунтов в связи с решением как теоретических, так и различных практических задач рассматривались также в работах зарубежных исследователей [7, 11]. На основании анализа опу-

бликованных научных работ по изучению неоднородности и изменчивости грунтов в массивах и возможностей, имеющихся в настоящее время программных средств для их пространственной оценки, можно выделить следующие основные содержательные задачи трехмерного инженерно-геологического моделирования полей изменения показателей состава и свойств грунтов (или «полей геологических параметров» — по И. С. Комарову) в массивах.

1. Анализ внутренней пространственной неоднородности слагающих массив геологических тел или их частей, в пределах которых каждый из рассматриваемых показателей можно считать случайной величиной. Таким образом может быть изучен характер изменчивости не только грунтов, разных в генетико-возрастном отношении, но и вскрыта внутренняя неоднородность условно однородных частей массива, в том числе и ИГЭ, выделяемых в исследуемом массиве в соответствии с нормативными документами.

2. Выявление в пределах выделенных ИГЭ или даже расчетных геологических элементов зон, характеризующихся наибольшими отклонениями значений поля показателя от расчетных величин, принятых в пределах нормативно допустимых вариаций. Такой дополнительный анализ для ответственных сооружений позволит скорректировать распределение нагрузок и/или посадку фундамента для снижения неравномерных осадок, крена и, следовательно, повысить безопасность сооружения.

3. Изучение градиентов изменения полей показателей состава и свойств, направленное на выявление их детерминированного компонента, обусловленного общей и закономерной направленностью процессов осадконакопления, лито- и эпигенеза. Такой анализ может также подтвердить или опровергнуть обоснованность границ между выделенными ИГЭ, что будет способствовать уточнению инженерно-геологической модели оснований.

Что же реально требуется сделать в инженерной геологии и геотехнике, чтобы корректно оценить пространственную неоднородность грунтов для обеспечения ее учета в явном виде в целях обеспечения безопасности проектируемых сооружений? Для решения этой задачи представляется логичным следующий принципиальный порядок действий.

Шаг 1. Необходима оценка изменчивости грунтов путем построения полей каждого исследуемого геологического параметра. Это информационное поле затем может анализироваться в 2D или 3D представлении для каждого показателя состава и свойств грунтов, используемого при анализе.

Шаг 2. Включение этих полей параметров в геологическую модель рассматриваемого мас-

сива с использованием специализированного программного обеспечения позволит получить новый тип инженерно-геологической модели, в явном виде отражающей грунтовые условия, включая их непрерывную неоднородность, вместо комбинации «кирпичиков» — ИГЭ, которые полагаются однородными, но таковыми не являются.

Шаг 3. Сопряжение такой инженерно-геологической модели с моделью (механической, термической, гидравлической, др.) сооружения или его фундамента будет означать возникновение и нового типа геотехнической модели основания сооружения — с непрерывным описанием вариаций ключевых параметров вместо конечных или граничных элементов с прерывистым изменением соответствующих показателей на их границах.

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с первыми двумя блоками задач, поскольку третий блок — сама возможность такого сопряжения — определяется разработкой программных средств, отличных от использующихся в настоящее время для этих целей преимущественно конечно-элементных решений.

## **2. Методика инженерно-геологического моделирования массива грунтов**

### **2.1. Общий подход к моделированию неоднородности грунтов**

Основным подходом к оценке изменчивости свойств грунтов в массивах сегодня являются методы математической статистики, которые ещё в 50-х годах прошлого столетия нашли свое применение в геологии. Первые работы в этом направлении принадлежат Б. П. Попову, широко использовавшему статистические методы при оценке условий строительства различных инженерных сооружений. Позднее вероятностно-статистические методы легли в основу метода установления гарантированных значений расчетных показателей, разработанного Н. Н. Масловым совместно с З.В. Пильгуновой [4]. Примерно в это же время был опубликован ряд работ Н. В. Коломенского и И.С. Комарова, в которых вопросы применения вероятностно-статистических методов в инженерной геологии нашли уже более полное, систематическое изложение. В 1959 г. в докладе Н. В. Коломенского и И. С. Комарова на XIII Геологическом конгрессе в Мехико была изложена общая схема применения вероятностно-статистических методов при изучении естественных оснований крупных инженерных сооружений, сохранившаяся без больших изменений до настоящего времени. Схема предусматривала использование модели случайной

величины и расчленение толщ пород на ИГЭ — условно однородные части массива горных пород, к которым такая модель может быть применена. Авторы старались показать, что методы математической статистики позволяют провести объективную и единообразную обработку материалов, а также дать оценку полученным результатам.

Среди существующих методов инженерно-геологической оценки массивов грунтов авторами были изучены естественно-статические и статистические методы, поскольку именно методы математической статистики могут обеспечить наиболее надежную оценку неоднородности грунтов. Идея естественно-статического метода заключается в том, что в природной среде геологические процессы стремятся прийти в равновесие с окружающими условиями, но этот процесс длится до тех пор, пока какие-либо естественные или искусственные причины не изменят эти условия. Естественно-статистический метод применим в различной геологической обстановке и для получения любых инженерно-геологических параметров, характеризующих инженерно-геологические условия, но требует массового количества данных.

Статистический метод оценки является наиболее точным и совершенным, но для его применения требуется детальное расчленение разреза и выполнение значительного объема горно-буровых работ, лабораторных и полевых определений показателей свойств грунтов. При этом следует придерживаться общего правила: обрабатываемый эмпирический материал должен относиться к качественно однородным геологическим объектам (горным породам), имеется в виду не вся толща в целом, а отдельные ее части — пласты, линзы или геологические тела иной формы. Это требование должно соблюдаться достаточно строго, так как средние значения, вычисленные для пород, искусственно объединенных в одну группу, лишены смысла и не могут быть использованы для каких-либо инженерно-геологических обобщений и заключений. Критерий однородности вводится в рассмотрение самим исследователем и во многом зависит от детальности исследований.

Методы математической статистики позволяют давать не только достаточно точную оценку, но при этом появляется возможность обрабатывать и анализировать огромные объемы данных. Анализ изменчивости свойств грунтов может выявить в пределах их массивов особенности изменения полей разных показателей в одних и тех же местах, то есть аналогичны ли они или претерпевают скачкообразные изменения, что будет говорить о характере взаимосвязи показателей этих свойств

и, тем самым, даст возможность более обоснованно судить о закономерностях их поведения в массиве. По этой причине при решении задачи о неоднородности полей показателей свойств грунтов в пределах выбранного объекта исследований и разработке его трехмерной инженерно-геологической модели авторы опирались на естественно-статистический подход, стремясь при этом исключить заведомое упрощение структуры этих полей и акцентируя внимание на ее изменениях, связанных с переходами на геологических и литологических границах.

## 2.2. Доступные инструменты моделирования

В настоящее время существует различное программное обеспечение (ПО) для численного моделирования массивов грунтов. Многие из них, такие как Midas, T-Navigator, Geotek Field, PLAXIS, Leapfrog Geo, основаны на методе конечных элементов и представляют собой пакеты вычислительных программ для расчёта напряжённо-деформированного состояния сооружений, фундаментов и оснований, используемые для решения задач инженерной геологии, геотехники и проектирования. Они в разной степени пригодны для построения полей изменения показателей в массиве и требуют развития в этом отношении.

Программная среда «Geotek Field», разработанная компанией НПП «ГЕОТЕК», является сегодня одним из наиболее приспособленных продуктов на российском рынке для решения вопросов, связанных с пространственной неоднородностью свойств грунтов, и в значительной мере направлена именно на такие задачи. Она позволяет проводить интерполяционные операции на основе аппроксимации Шепарда, триангуляции с линейной интерполяцией, а также метода кригинга. Однако пока это ПО имеет ряд ограничений и требует определенной доработки, поскольку интерполяция не осуществляется корректно при большом (более 50 м) расстоянии между выработками или при неоднородном распределении выборки, что воспринимается как недостаточность материала для интерпретации. Помимо этого, имеются ограничения, связанные с невозможностью задания малой глубины исследования и масштабирования полученной визуализации модели, в результате которого получается дополнительное искажение картины поля.

Наилучшим образом реализовать оценку пространственной неоднородности свойств грунтов оказалось возможным на программной платформе Petrel, разработанной компанией Schlumberger, которая широко используется в нефтегазовой геологии и при нефедобыче. Это ПО позволяет выполнять корреляцию пластов по скважинным данным,

интерпретировать данные сейсморазведки, строить модели коллекторов, визуализировать результаты моделирования коллекторов, рассчитывать объемы, проводить анализ данных (построение вариограмм, гистограмм), а также включает в себя модули литолого-фациального и петрофизического моделирования. С его помощью можно проводить подсчет запасов, создавать карты и разрабатывать стратегии разработки для максимально полной эксплуатации коллектора. Таким образом, не будучи специализированным инженерно-геологическим или геотехническим ПО, Petrel ориентирован на задачу выявления геологической неоднородности среды и оценку неоднородностей, вызванных изменчивостью свойств подземных резервуаров. Это важная отличительная особенность данного ПО, что и позволило использовать его для решения поставленных нами задач. Кроме того, это уже хорошо апробированное большим количеством пользователей-геологов программное обеспечение.

## 2.3. Основные этапы создания инженерно-геологической модели

Разработка программного комплекса Petrel seismic-to-simulation началась в 1996 году, в результате был получен интегрированный инструмент, позволяющий работать специалистам геологам и геофизикам сообща и предоставляющий нефтегазовым компаниям возможность находить креативные решения в области гидродинамического моделирования [3]. Данный программный пакет, работающий с набором неких случайных данных, может быть, по мнению авторов, с успехом использован и в инженерной геологии, в том числе для решения задачи изучения пространственной неоднородности массива грунтов.

Весь процесс построения трехмерной инженерно-геологической модели можно подразделить на несколько этапов.

Первый этап моделирования достаточно банален. Он заключается в импорте исходных данных, корреляции слоев по скважинам, создании поверхностей и трехмерной решетки. Цель ее построения — создание пространственной сетки, которая будет использована как основа для создания 3D ячеек с рассматриваемыми параметрами. Шаг сетки составляет 1 м, что позволяет достаточно подробно представить модель рассматриваемого массива грунтов.

Второй этап включает в себя детализацию полученного каркаса и упрощение инженерно-геологической ситуации исследуемой территории. Часто в результате изысканий по всей толще в разрезе может быть выделено  $n$ -ое количество ИГЭ, кото-

рые по свойствам существенно не различаются, что ставит под вопрос целесообразность выделения такого количества элементов. В связи с этим авторы задаются следующим вопросом: есть ли смысл усложнения лишь на первый взгляд кажущейся неоднородной толщи?

Завершающий шаг в построении структурного каркаса — это задание мощности и ориентировки слоев между горизонтами трехмерной сетки. Слои должны задаваться на основе показателей моделируемых свойств. При этом разбиение на слои только увеличивает разрешение сетки, для этого процесса не используются никакие дополнительные входные данные.

Создав каркас модели, можно приступать к моделированию полей рассматриваемых показателей свойств грунтов. Однако этапу моделирования предшествуют операция перемасштабирования данных, для которых используются анализируемые авторами показатели свойств грунтов и вариограммный анализ.

Перемасштабирование — это процесс преобразования, а именно усреднения, данных по скважинам для использования их в процессе моделирования свойств, поскольку размер ячейки трехмерного грида больше, тогда как самой ячейке грида можно присвоить только одно значение. Перемасштаби-

рованные значения становятся свойством трехмерного грида и не изменяются при любых процессах моделирования. При перемасштабировании изменяются только свойства ячеек, через которые проходит траектория скважины, значения в остальных ячейках остаются неизменными.

Важным свойством пространственно распределенных данных является их непрерывность, которая означает, что близко расположенные в пространстве измерения скорее всего будут иметь близкие значения. Пространственная непрерывность данных обычно описывается с помощью корреляционных и ковариационных функций, а именно построением вариограммы. Если говорить простыми словами, то вариограмма характеризует степень различия данных в зависимости от расстояния между ними, и может быть представлена графиком зависимости дисперсии от расстояния (рис. 3). Чем ближе значения данных (меньше разница между ними), тем больше значение вариограммы.

Для оценки вариабельности пространственной функции, в том числе в ПО Petrel, используют методы стохастического моделирования, которые позволяют получить множество реализаций значений функции в точке оценивания для заданного набора данных и выбранных параметров модели [10]. При этом каждая реализация обладает опре-

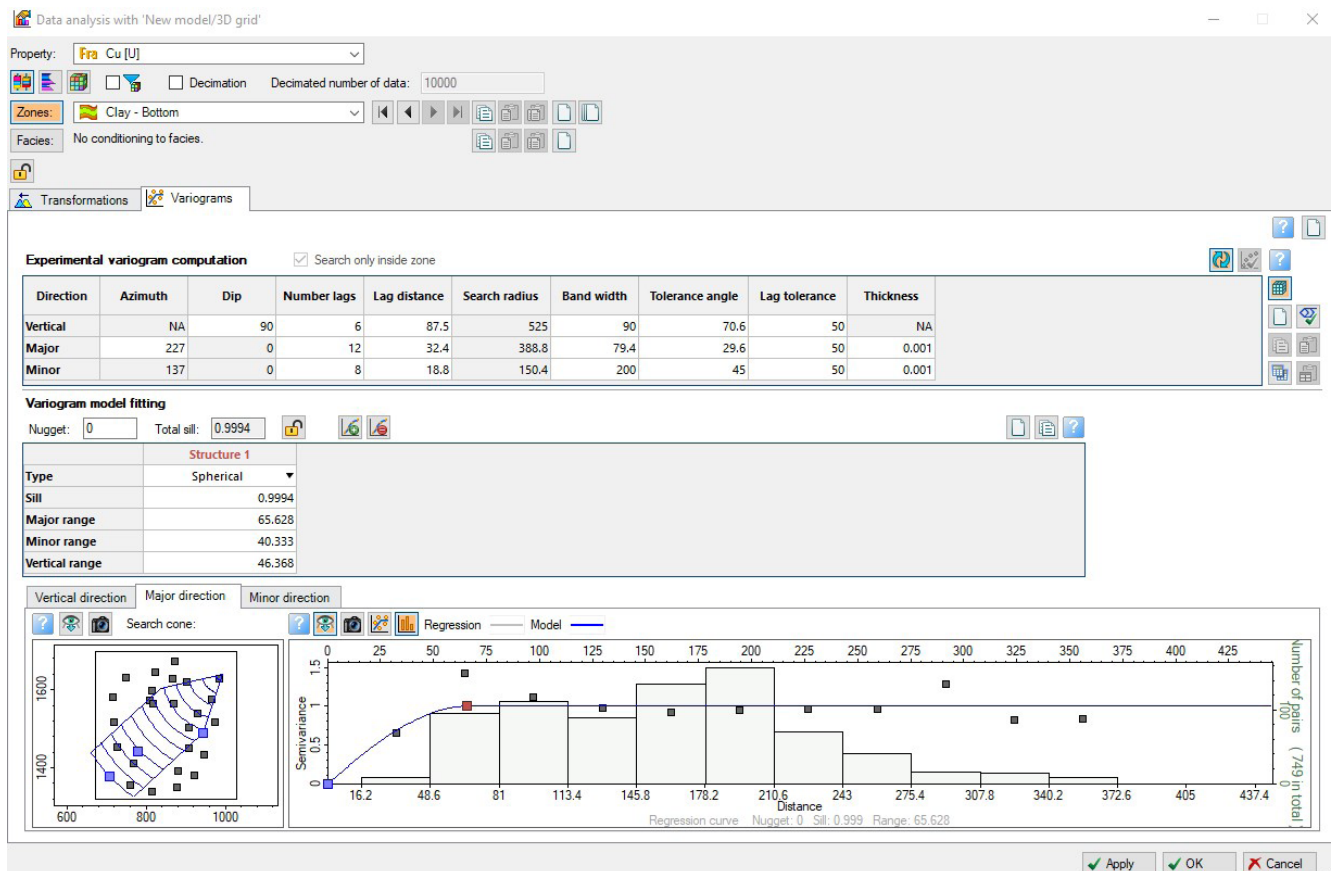


Рис. 3. Фрагмент окна вариограммного анализа в Petrel и график зависимости дисперсии от расстояния

деленными свойствами (в том числе и вариабельностью) исходного процесса, т.е. любая реализация является возможной моделью исходных данных. Таким образом, стохастическое моделирование позволяет оценивать пространственную неопределенность процесса.

Существуют различные подходы к стохастическому пространственному моделированию [9]. Один из них основан на принципе последовательного моделирования, который и использовался авторами в данной работе. Основой такого последовательного подхода является возможность перейти от совместной условной функции распределения к произведению локальных условных функций.

Последовательное Гауссово моделирование (sequential Gaussian simulation) воспроизводит непрерывные переменные. Метод последовательного стохастического Гауссова моделирования предполагает совместное нормальное распределение моделируемой случайной величины в исследуемой области, которое описывает распределение вероятностей нескольких случайных величин и является естественным продолжением одной случайной величины. Совместное нормальное распределение называется мультинормальным и предполагает распределение всех компонент (во всех точках) по стандартному нормальному закону. В этом случае для любой точки области локальная функция будет распределена по нормальному закону и определена двумя параметрами — средним значением и дисперсией [3].

Основным преимуществом метода последовательного Гауссова моделирования является его простота, основанная на хорошо известном и понятном поведении нормального распределения, который позволяет получить реализации переменной, принимающей непрерывные значения, например, концентрации загрязнения или пористости породы. Для использования метода не имеют значения размеры области пространства. Таким образом, для построения и изучения пространственной неоднородности массива грунтов такие показатели их физических и физико-механических свойств, как плотность грунта, модуль деформации и угол внутреннего трения, а также суффозионная устойчивость грунтов, были проанализированы авторами методом последовательного Гауссова моделирования.

### **3. Инженерно-геологическая характеристика моделируемого массива**

Количественный пространственный анализ неоднородности массивов грунтов на значительных площадях весьма затруднен не столько вычислительными возможностями и громоздкостью такой

задачи, сколько необходимостью большого объема однородных и относительно равномерно распределенных данных. Поэтому на сегодняшний день решение перечисленных задач представляется целесообразным для оснований крупных и ответственных сооружений, проектирование которых требует привлечения значительных объемов инженерно-геологической информации.

Рассмотрим некоторые возможности предлагаемого нами подхода на примере массива грунтов основания одного из таких сооружений. В строении этого массива до глубины 35 м участвуют в основном дисперсные четвертичные (преимущественно ледниковые и водно-ледниковые) грунты: суглинки, глины и кварц-полевошпатовые пески с включениями гравия, гальки — и кембрийские: песчаники, глины. В разрезе прослеживается также погребенная ложбина, которая связана с довалдайским ярусом палеорельефа и заполнена более молодыми осадками.

В результате анализа собранных при инженерных изысканиях данных в разрезе массива было выделено около 40 инженерно-геологических элементов. По описанию многие из них весьма близки между собой и, очевидно, формируют единые геологические тела, но отличаются некоторыми особенностями (например, вариациями крупности песков), которые, собственно, и являются отражением внутренней неоднородности этих тел. В результате на разрезе, фрагмент которого, построенный по данным 25 скважин, приведен на рисунке 4 появляется большое количество линзовидных тел небольшой мощности без контрастно различающихся свойств, выделенных на основании отличий какого-то одного показателя, полевого описания либо текстурных особенностей, что приводит к появлению множества субъективно проведенных на разрезе границ (линзы ведь надо как-то замыкать), поскольку фациальные размытые границы также становятся при расчете границами ИГЭ, что только усложняет инженерно-геологическую модель.

На первом этапе для целей моделирования и для исключения возможных погрешностей, связанных с нарушением случайного характера распределения геологических параметров, описанная выше толща может быть предварительно разбита на три разные зоны:

I зона — зона развития четвертичных песчано-глинистых отложений ледникового и флювиогляциального генезиса;

II зона — зона песчаников нижнего кембрия;

III зона — зона развития нижнекембрийских глин.

Кроме того, влияние на структуру поля ряда показателей свойств грунтов будут оказывать условия обводнения массива. В гидрогеологическом отношении на этой территории выделяются водоносные комплексы, приуроченные как к четвертичным отложениям, так и к дочетвертичным породам. Все генетические различия четвертичных отложений в различной степени обводнены и представляют собой водоносные комплексы и горизонты. Уровень грунтовых вод на данном участке практически совпадает с дневной поверхностью, следовательно, все рассматриваемые грунты находятся в массиве в водонасыщенном состоянии, и все анализируемые далее показатели определены в водонасыщенном состоянии. Многолетнемерзлые грунты отсутствуют.

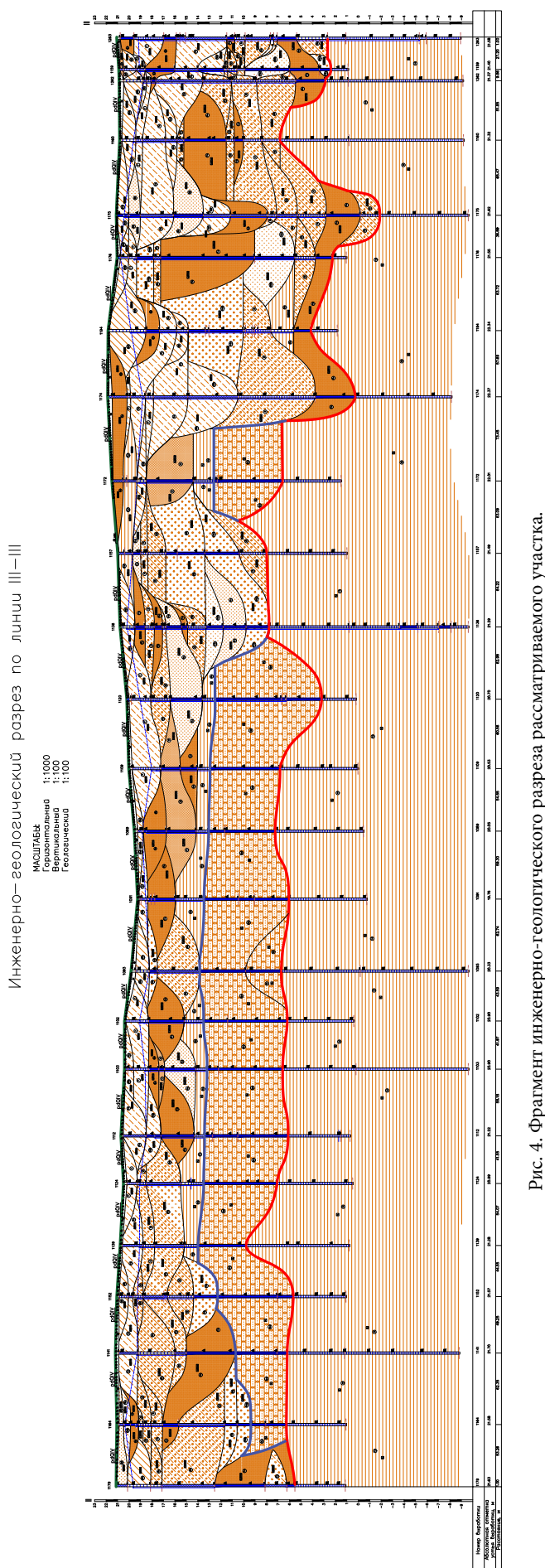
Участок размещения проектируемого объекта изучен весьма подробно, в его пределах на разных стадиях изысканий пройдено большое количество инженерно-геологических скважин (порядка 1500 штук), точек статического зондирования, выполнен большой объем лабораторных исследований грунтов.

Все это обеспечивает значительный размер выборки фактических данных по любому из исследуемых параметров, причем эти данные распределены достаточно равномерно в объеме рассматриваемого массива.

При дальнейшем анализе следует иметь в виду, что структура пространственной неоднородности инженерно-геологических параметров массива грунта может, в том числе и одновременно, контролироваться несколькими факторами, в зависимости от типа рассматриваемого параметра. Изменчивость параметров первого типа контролируется как литологической неоднородностью, так и преобладающим типом контактов между частицами грунта. К таким параметрам можно отнести коэффициент фильтрации, пористость, модуль деформации, сцепление и т.д. В таком случае поле неоднородности содержит контрастные границы, которые ассоциируются с расположением в пространстве тех или иных литологических разностей.

Изменчивость параметров второго типа может контролироваться какими-либо трендами. Например, изменение влажности (водонасыщенности с глубиной) в первую очередь определяется глубиной залегания УГВ и высотой капиллярного поднятия. В таком случае поле неоднородности имеет плавные градации изменения параметров, т.е. контрастные границы отсутствуют. Но в данном случае все грунты насыщены водой, и этот фактор не будет менять структуру поля показателя.

Изменчивость третьих параметров не коррелирует ни с одним из известных признаков. В таком



случае поле неоднородности принимает случайное (в установленном диапазоне) распределение параметров в пространстве. К таким параметрам могут относиться, например, характеристики трещиноватости или закарстованности массива.

Применительно к рассматриваемому объекту анализировались поля показателей только первых двух типов.

#### 4. Анализ результатов пространственного моделирования неоднородности массива грунтов

##### 4.1. Типизация грунтов верхней части разреза

При анализе полей инженерно-геологических показателей грунтов, в том числе и физико-механических свойств, для верхней зоны разреза до глубины 10–12 м авторами использовались характеристики, рассчитанные по данным статического зондирования. Преимущество статического зондирования заключается в возможности расчета целого ряда необходимых показателей в массовом количестве на основе общепринятых и хорошо зарекомендовавших себя в практике изысканий корреляционных соотношений, что позволяет получить более достоверную структуру полей исследуемых показателей, чем по данным из отдельных точек пробоотбора. Эта верхняя зона рассматриваемого массива имеет наиболее пестрый состав и представлена чередованием четвертичных песчано-глинистых отложений ледникового и водно-ледникового генезиса (рис. 4).

Выделение разновидностей грунтов по гранулометрическому составу проводилось на основе так называемого фрикционного отношения по [2] — соотношения сопротивления грунта под наконечником зонда II типа и трения на участке его боковой поверхности:

$$R_f = f_s / q_c,$$

где  $f_s$  — удельное трение на участке боковой поверхности зонда,  $q_c$  — измеренное удельное сопротивление под наконечником зонда, соответственно.

Сопоставление между собой фрагмента верхней части инженерно-геологического разреза, представленного выше на рисунке 4, и распределения гранулометрических разновидностей грунтов по структуре фрикционного отношения грунта (рис. 5) показывает следующее:

- разрез верхней зоны преимущественно песчано-супесчаный с отдельными «пятнами» суглинков и глин, в целом, существенно менее глинистый и более однообразный, чем изображено на инженерно-геологическом разрезе;

- в построенном поле показателя  $R_f$  действительно просматриваются некие прерывистые, условно линзовидные тела, границы которых, однако, даже не напоминают нарисованные на разрезе произвольные контуры ИГЭ, вообще не выделяющиеся в большинстве случаев убедительно;
- эти тела имеют между собой неотчетливые и очень неровные «диффузные» границы, указывающие на часто случайный характер смены преобладающей дисперсности грунтов по глубине и постепенный, но обычно закономерный — по латерали.

Таким образом, при ближайшем рассмотрении разреза с помощью моделирования на основе методов геостатистики, строение верхней части грунтового основания оказывается заметно более простым, чем следует из ручной произвольной рисовки многочисленных мелких линзовидных ИГЭ, которые просто придуманы для согласования имеющихся в недостаточном количестве фактических данных с вариациями, наблюдаемыми по отдельным скважинам. Таким образом, на полученном разрезе каждая отдельная скважина вскрывает набор каждый раз разных мелких ИГЭ, часто не соединяющихся между собой. При этом поле рассматриваемого показателя, трансформированное в поле распределения гранулометрических разностей водонасыщенных грунтов, получено в общем-то по тому же набору исходных данных, что и набор многочисленных ИГЭ (а их в этой части разреза нарисовано 22 шт.), но проанализированных в их общей совокупности, а не по 6–10 показателям на элемент.

Такой анализ позволяет увидеть общую картину строения массива или его части, а также может быть особенно полезен при пестром строении и частом чередовании фаций или гранулометрических разновидностей грунтов, которое затрудняет детальное расчленение. В данном случае мы получили незакономерную изменчивость состава грунтов в любом сечении толщи, а значит, можем вполне обоснованно принять случайный характер распределения и показателей их свойств.

##### 4.2. Поле изменения плотности грунтов

На картине поля плотности грунтов (рис. 6), значения которой в целом варьируют от 1,4 до 2,2 г/см<sup>3</sup>, видно, что изменение ее с глубиной соответствует скачкообразной незакономерной изменчивости. Гистограмма распределения плотности иллюстрирует нормальное распределение данных. Но на этом фоне наблюдаются всплески частоты встречаемости как максимальных, так и минимальных значений,



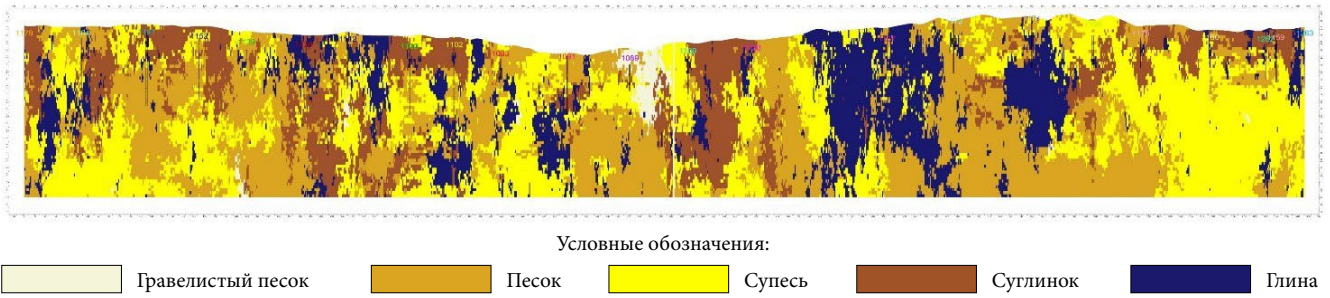


Рис. 5. Распределение гранулометрических разновидностей грунтов по полю индекса типа поведения грунта в верхней зоне разреза

которые в случае плотности характерны только для первой зоны — зоны распространения моренных и водно-ледниковых четвертичных отложений. В целом поле плотности достаточно однородно, ее изменение во всей толще происходит в диапазоне от 1,6 до 1,9 г/см<sup>3</sup>, помимо первой зоны, которая выделяется своей пестротой и явной неоднородностью.

При рассмотрении гистограммы плотности верхней зоны (четвертичных отложений) (рис. 7) выделяются два выпадающих из нормально распределенной выборки крайних диапазона значений — с минимальным 1,4 г/см<sup>3</sup>, приуроченных к глинам тугопластичной и мягкопластичной консистен-

ции, а также к пылеватому водонасыщенному песку и суглинку твердому и полутвердой консистенции; и с максимальным значением — 2,2 г/см<sup>3</sup>, которые получены для моренных супеси и суглинка твердой консистенции с включениями гравия и гальки. С последним фактом, вероятнее всего, и связаны эти повышенные значения плотности у суглинков и супеси. Относительно пониженные же значения плотности обусловлены частой заторфованностью приверхностных грунтов на этом участке.

Тем не менее следует отметить, что подобные отклоняющиеся значения плотности — это действительно лишь частные случаи на общем достаточно однородном фоне, так как плотность кем-

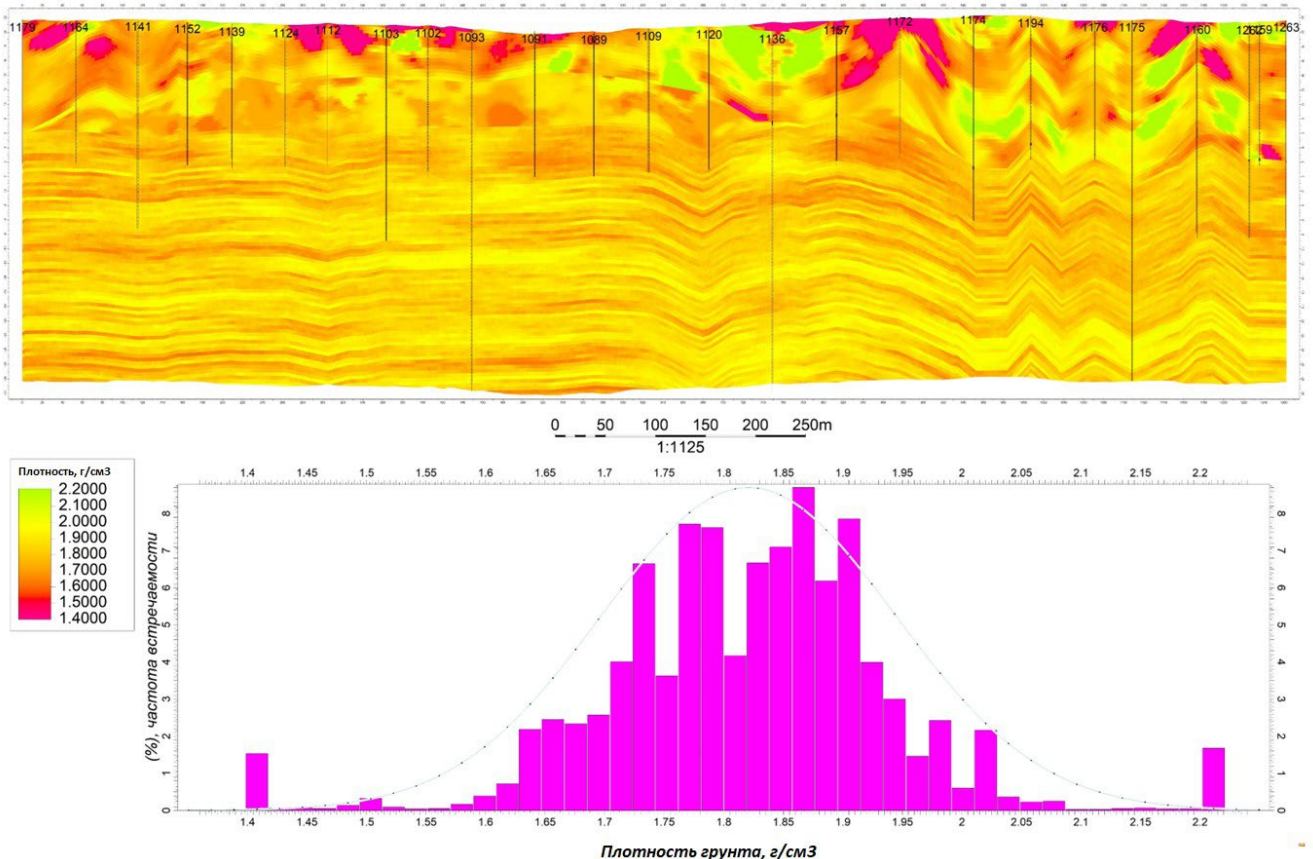


Рис. 6. Распределение показателя плотности грунтов в разрезе

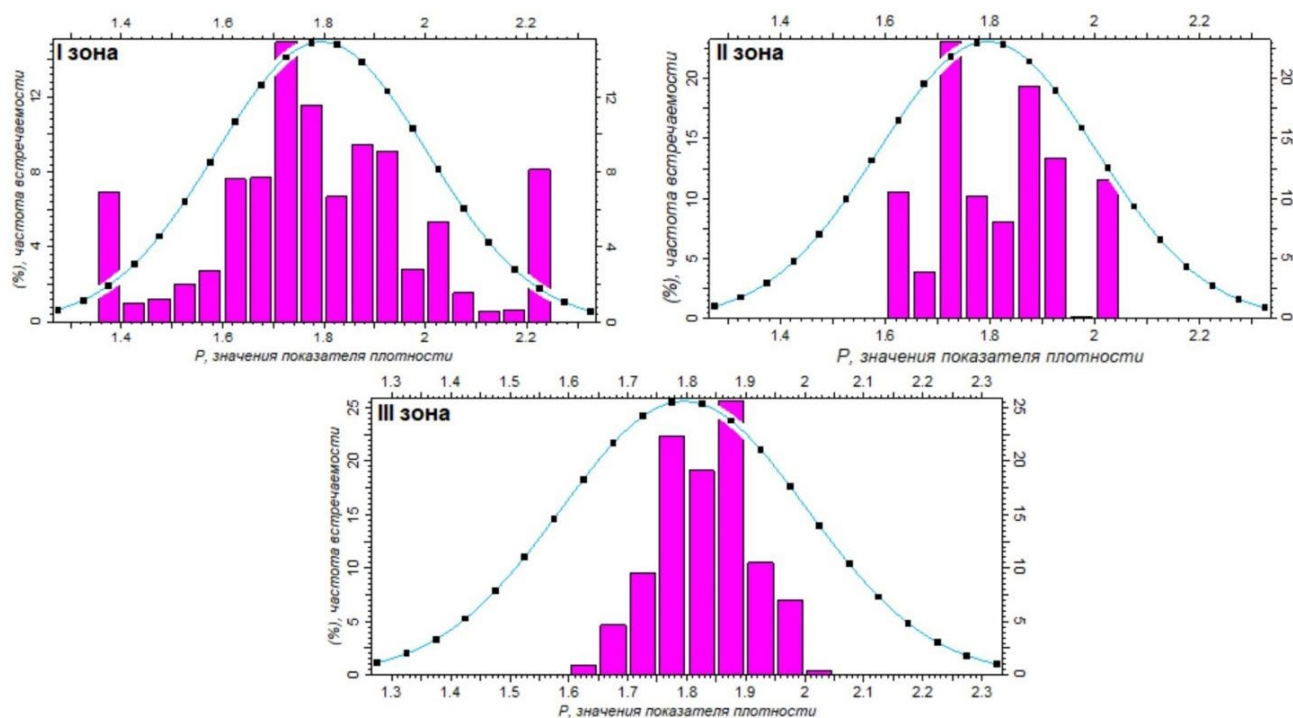


Рис. 7. Гистограммы распределения показателя плотности грунтов в каждой зоне (I-III) разреза

брийских глин оказалась близка к этому показателю для моренных и флювиогляциальных отложений. Иными словами, поле неоднородности по данному показателю характеризуется случайным распределением во всем рассмотренном пространстве и, следовательно, он не может быть скоррелирован с какими-либо другими показателями.

В то же время при анализе полей распределения параметра плотности следует еще раз обратить внимание, насколько отчетливо проступают внутренние границы в структуре полей параметров, которые хорошо видны в первой зоне также в связи с наличием врезанной палеодолины, то есть изополя показателей отображают ее форму, реагируя на заполнение иными грунтами, что подтверждает правильность проводимой интерполяции. Также анализ данных параметров показывает, что имеются две условно однородные зоны (II и III) и одна неоднородная зона. Это согласуется с геологическим строением и подтверждает работоспособность предлагаемой методики моделирования поля показателей свойств.

#### 4.3. Поля изменения физико-механических свойств грунтов

В качестве характеристик физико-механических свойств авторами были выбраны модуль деформации и угол внутреннего трения, поскольку они могут быть получены для любых дисперсных грунтов из данных статического зондирования с конусом II типа (с отдельным измерением сопротивления под нако-

нечником зонда и на участке его боковой поверхности с одновременным контролем порового давления, возникающего при внедрении инструмента), в отличие от сцепления, поле которого в этом существенно песчаном разрезе получится малоинформативным из-за малого числа значений.

При анализе полей распределения показателей модуля деформации и угла внутреннего трения (рис. 8, 9), следует отметить, что в обоих случаях изменчивость, судя по градиенту цвета изополей, скачкообразная и незакономерная, что согласуется с неоднородностью верхней толщи, представленной на рисунке 4. В целом для верхней части массива преобладающие значения модуля деформации (рис. 8) варьируют в диапазоне от 50 до 100 МПа, а угла внутреннего трения (рис. 9) — от 28° до 34°. На этом фоне имеются всплески встречаемости в верхнем и нижнем квартилях. Аномально высокие для данного разреза значения модуля деформации — свыше 400 МПа и угла внутреннего трения — до 42° приурочены к плотным моренным супесям с примесью гравийно-галечного материала. Существенной особенностью графика распределения модуля деформации (рис. 8) является заметное количество значений (около 10%) показателя в диапазоне всего лишь 5–10 МПа. Эти значения встречаются в толще пятнами (черно-красные изополя на рисунке 8) и связаны с участками развития водно-ледниковых суглинков и глин, реже — пылеватых песков, местами обогащенных органическим веществом.

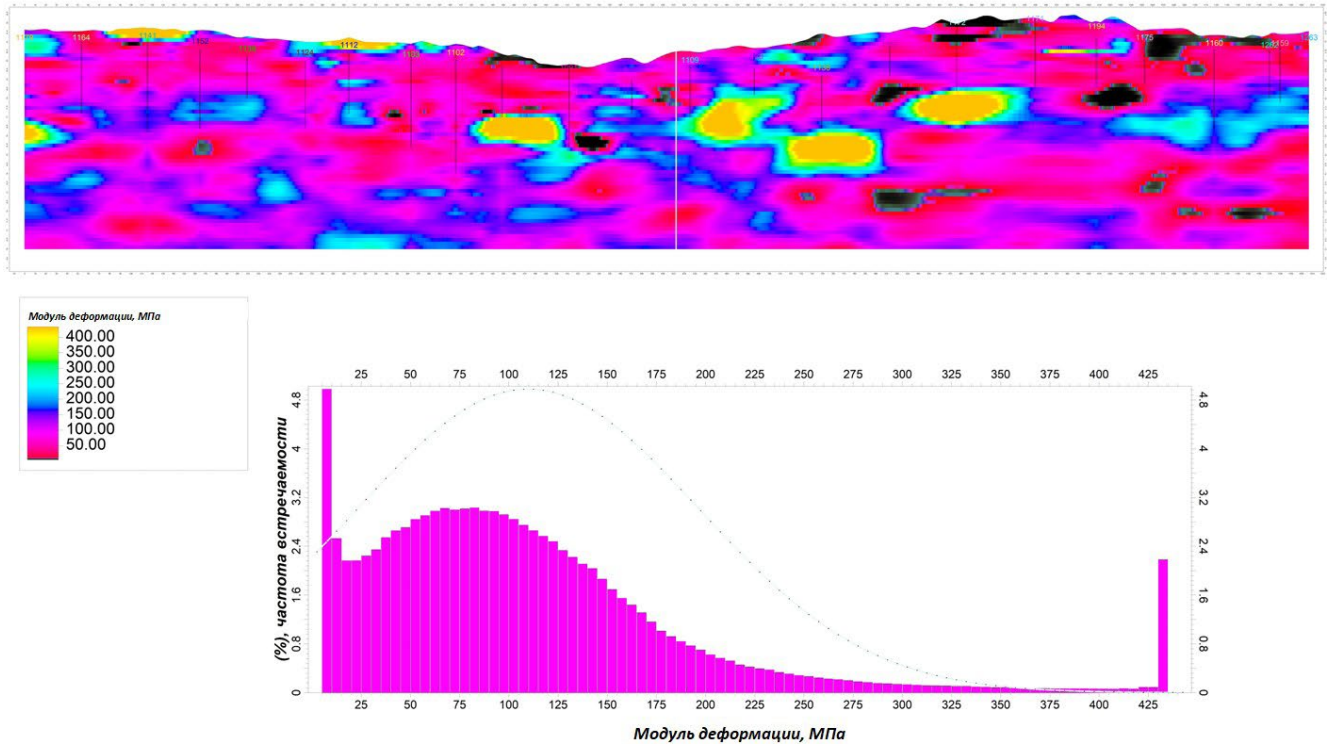


Рис. 8. Распределение модуля деформации грунтов в верхней части разреза

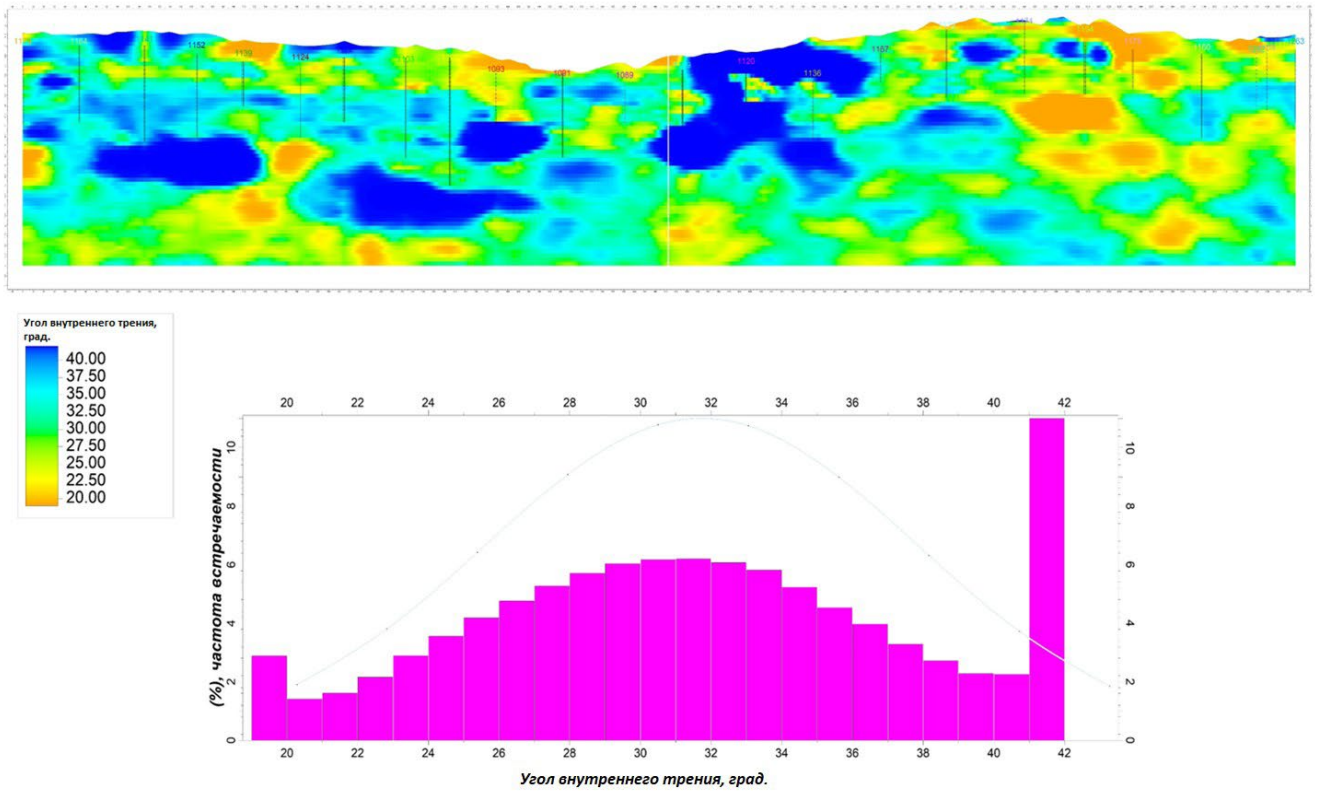


Рис. 9. Распределение угла внутреннего трения грунтов в верхней части разреза

Таким образом, в рамках представленной модели поля показателей физико-механических свойств тесно связаны с литологией и разновидностями грунтов по гранулометрическому составу.

В этом случае можно прийти к тому, что для корректных расчетов оснований в таких пестрых толщах вообще, может быть, не требуется выделение ИГЭ, если достаточно качественно изучено поле неоднородности каждого из необходимых параметров. Ведь факт построения поля показателя(ей) означает создание вероятностно-статистической модели основания, каждой точке которой сопоставлено конкретное значение исследуемой величины, что открывает принципиальную возможность не только для уточнения инженерно-геологической ситуации, но и для ее прямого использования в проектных расчетах.

#### 4.4. Поле изменения суффозионной устойчивости грунтов

Аналогично показателям свойств грунтов, можно изучать пространственное распределение любых количественных характеристик процессов, происходящих в и массивах. В нашем случае в качестве примера, на котором демонстрируется возможность применения представленного подхода, рассмотрена суффозионная устойчивость широко распространенных в верхней части разреза четвертичных песков континентального генезиса, входящих, в свою очередь, в состав девяти разных ИГЭ. Оценка суффозионной устойчивости грунтов осуществлялась по двум показателям: на основе соот-

ношения максимального и минимального диаметра частиц, в соответствии с формулой М. П. Павчича (1961) (рис. 10), а также по коэффициенту неоднородности песков  $C_u$  (рис. 11):

$$d_{max}^{ci} \leq d_3 \dots d_5,$$

$$d_{max}^{ci} = 0,77d_{max}^0,$$

где  $d_{max}^{ci}$  — максимальный размер частиц, которые могут быть вынесены фильтрационным потоком в результате суффозии;  $d_{max}^0$  — диаметр максимальных фильтрационных пор в грунте, определенный по формуле М. П. Павчича:

$$d_{max}^0 = 0,455k^6\sqrt{C_u}ed_{17},$$

где  $k$  — коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте или коэффициент локальности суффозии:

$$k = 1 + 0,05 C_u$$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}},$$

где  $C_u$  — степень неоднородности грунта;  $d_{10}$ ,  $d_{60}$  — диаметр частиц соответственно 10, 60 процентной обеспеченности (диаметры частиц, меньше которых в данном грунте содержится (по массе) соответственно 10, 60 % частиц);  $e$  — коэффициент пористости.

Приведенный анализ верхней части массива демонстрирует, что потенциально суффозионно-неустойчивые пески присутствуют, при этом выделенные зоны по обоим критериям конформны и локализованы в одних и тех же местах разреза.

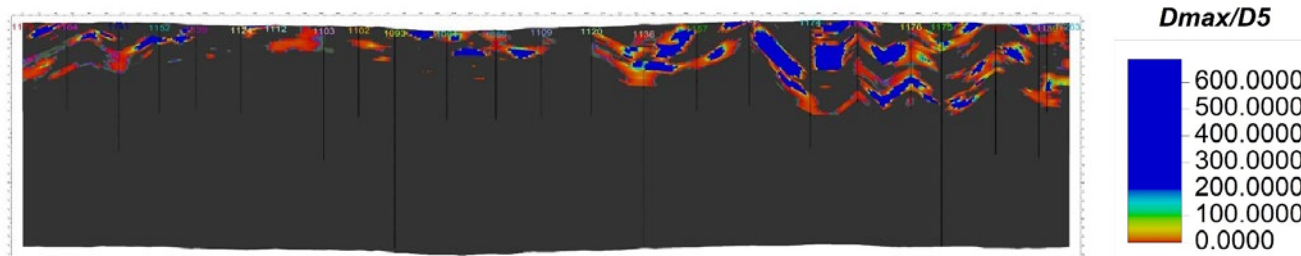


Рис. 10. Распределение зон суффозионно-неустойчивых грунтов по показателю  $D_{max}/D_5$  в верхней части разреза (критическое значение 1.0)

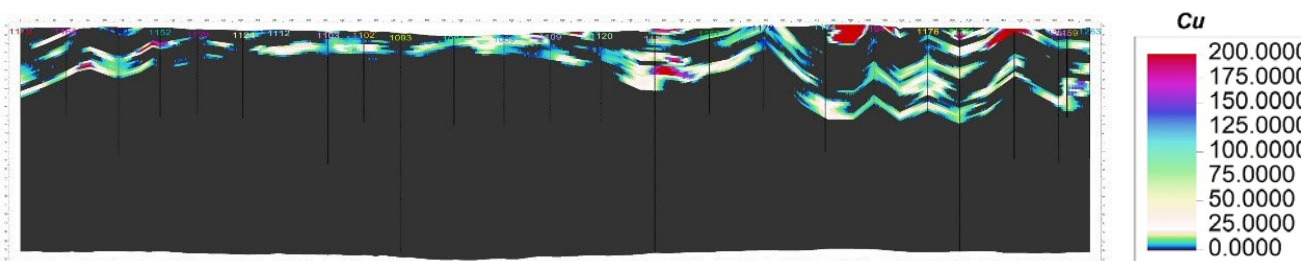


Рис. 11. Распределение зон суффозионно-неустойчивых песков по показателю неоднородности гранулометрического состава  $C_u$  в верхней части разреза (критическое значение 20)

Анализ всех рассмотренных выше в статье свойств грунтов, показывает, что построение полей распределения их показателей позволяет не только уточнить границы распространения тех или иных разностей грунтов в массиве, но и выявить, учесть те самые «аномально» высокие или низкие значения показателей, которые при стандартной статистической обработке могут быть попросту отбракованы, а они между тем часто оказываются значимыми для правильной оценки поведения массива в целом. Кроме этого, если сопоставить инженерно-геологический разрез с полями распределения показателей, то оказывается, что поля неоднородности параметров, необходимые для геотехнических расчетов и инженерных задач, могут совсем не соответствовать границам выделяемых ИГЭ.

Изучение изменчивости свойств грунтов дает возможность выявить особенности изменения полей разных показателей в одних и тех же местах, определить характер взаимосвязи показателей этих свойств и тем самым более обоснованно судить о закономерностях их поведения в массиве. Используемые же сегодня подходы к прогнозированию свойств грунтов в межскважинном пространстве, а также изменению характеристик в сложных инженерно-геологических системах дают лишь некоторую оценку меры неоднородности строения толщ, которая может заметно отличаться от истинной меры неоднородности и зависит от детальности изучения объекта.

Таким образом, пространственное моделирование неоднородности показателей состава и свойств грунтов позволяет получить дополнительную информацию, которая может быть учтена при выборе места расположения сооружения, для уточнения расчетов или назначения точек дополнительных исследований.

## Выводы

1. Неоднородность грунтов проявляется в значимых различиях показателей их состава и свойств между двумя точками, а пространственная неоднородность рассматриваемых признаков определяет их изменчивость, характерную для всех грунтов. Оценка изменчивости свойств грунтов в массивах можно проводить с помощью методов математической статистики, не только дающих ее достаточно точную оценку, но и позволяющих

анализировать большие объемы фактических данных.

2. Структура полей геологических параметров различается для разных стратиграфо-генетических комплексов горных пород. При этом поля целого ряда показателей состава и свойств грунтов исследованного в работе массива отражают условия их залегания и осадконакопления, но достаточно однородны в пространственном отношении, и границы между выделенными многочисленными ИГЭ в них не проявляются. Такой анализ неоднородности позволяет увидеть общую картину строения массива или его части, может быть особенно полезен при пестром строении и частом чередовании разновидностей грунтов, характерном, например, для четвертичных отложений, затрудняет детальное расчленение разреза.

3. Внутри некоторых выделенных ИГЭ отмечаются заметные вариации показателей, особенно физико-механических свойств, обусловленные, в первую очередь, особенностями литологического состава грунтов, которые могут превышать их различия между ИГЭ. Кроме этого, поля изменения параметров, необходимых для геотехнических расчетов, могут не подтверждать границы выделяемых ИГЭ, что открывает возможность улучшения этого формального подхода или даже отхода от него.

4. Распределение ряда показателей (плотности, модуля деформации и угла внутреннего трения) характеризуется наличием всплесков в области максимальных и минимальных значений, являющихся не только дополнительной характеристикой неоднородности грунтов, но и свидетельствующих о не случайности таких «выбросов», об их типичности, которые целесообразно учитывать.

5. Анализ пространственной неоднородности массивов грунтов позволяет получить дополнительную полезную информацию и о потенциальной возможности развития в них неблагоприятных геологических процессов. Так, количественные характеристики гранулометрического состава песков дали возможность выявить в разрезе рассмотренного массива суффозионно-неустойчивые разности, положение которых следует учитывать при проходке котлованов и увеличении при этом гидравлических градиентов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарик Г. К., Ярг Л. А. Инженерно-геологические изыскания. 2-е изд. Москва. КДУ, 2008. 424 с.
2. ГОСТ 19912–2012 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием.
3. Демьянов В. В., Савельева Е. А. Геостатистика: теория и практика. М.: Наука. 2010. 327 с.
4. Комаров И. С. Накопление и обработка информации при инженерно-геологических исследованиях. М., «Недра», 1972. 296 с.
5. Коломенский Н. В. Общая методика инженерно-геологических исследований. «Недра», 1968. 342 с.
6. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. 2-е изд. Л.: «Недра», 1984. 511 с.
7. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. Изд-во «Мир», 1968. 408 с.
8. Паввич М. П. Способ определения несущих гранулометрических составов грунта // Известия ВНИИГ. 1961. Т. 68. С. 197–202.
9. Chilès J.-P., Delfiner P. Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty, Wiley: New York. 1999, 695 p.
10. Journel A. G., Huijbregts C. J. Mining Geostatistics. Academic Press, London, 1978, 600 p.
11. de Marsily Gh., Delay F., Gonçalves J., Teles R.Ph.V. Violette S. Dealing with spatial heterogeneity, Hydrogeological Journal. 2005. 2005. 13. P.161–183.

DOI 10.53278/2306-9139-2023-2-21-29-35

УДК 624.131.7

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ОСАДОК ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

### THE GEOLOGICAL BASIS FOR CALCULATING OF THE GROUND BASE SETTLEMENT

© 2023 г. Г. П. Постоев<sup>1</sup>, А. И. Казеев<sup>2</sup>, М. М. Кучуков<sup>3</sup>  
© 2023 German P. Postoev<sup>1</sup>, Andrey I. Kazeev<sup>2</sup>, Marat M. Kuchukov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН),  
Уланский переулок, д. 13, стр. 2 (а/я 145), Москва, 101000, Россия  
<sup>1,2,3</sup>Sergeev Institute of Environmental Geoscience of Russian Academy of Sciences (IEG RAS), Ulansky lane,  
13, bld 2 (POB 145), Moscow, 101000, Russia

opolzen@geoenv.ru<sup>1</sup>, kazeev@yandex.ru<sup>2</sup>

**Аннотация.** В статье рассматриваются геологические закономерности преобразования напряжённо-деформированного состояния (НДС) грунтового основания путем образования диссипативных геологических структур, осуществляющих взаимодействие геологической среды и фундамента. Представлена технология (метод) расчета осадки грунтового основания. На конкретном примере оценки осадки ленточного фундамента показано, что предлагаемая технология работоспособна и может быть в дальнейшем использована для практических целей.

**Abstract.** The article discusses the geological regularities of the transformation of the stress-strain state of the soil foundation through the formation of dissipative geological structures that interact between the geological environment and the foundation. The technology of calculation of the ground base settlement is presented. A specific example of estimation of strip foundation settlement shows that the proposed technology is efficient and can be further used for practical purposes.

**Ключевые слова:** геологическая среда; геологические закономерности; диссипативные геологические структуры; ленточный фундамент; уравнение предельного давления; критическое значение осадки; осадка в текущий момент времени; тестовый пример

**Key words:** geological environment; geological regularities; dissipative geological structures; strip foundation; equation of limit pressure; critical value of settlement; current settlement; test case

#### Введение

Поводом для написания данной статьи послужила публикация в журнале «Грунтоведение» работы [3], в которой дана критика существующих представлений об осадке грунтового основания как уплотнения под нагрузкой от фундамента и методов расчета путем послойного суммирования. Авторы работы [3] предлагают рассматривать осадку грунтов основания как многофакторный интегральный инженерно-геологический процесс, как реакцию грунтового массива на воздействие нагрузки от фундамента, полагая, что происходит не просто уплотнение грунтового основания, а его вертикальное оседание вследствие снижения прочности грунтов и их деформирования под влиянием природных и техногенных факторов.

Действительно, необходимость выявления геологических закономерностей, обуславливающих формирование осадки фундамента, является важным вызовом для проведения соответствующих фундаментальных исследований. В ИГЭ РАН в последние годы проводятся исследования закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива как защитной его реакции при локальном внешнем силовом возмущении в виде оползневого очага, подземной полости, техногенного воздействия. Выявлены закономерности образования в массиве диссипативных геологических структур (ДГС), которые регламентируют изменение НДС и процесс подготовки разрушительных деформаций, в том числе в основании фундамента [9].

**Исходное напряжённо-деформированное состояние в массиве**

Грунтовое основание рассматривается не как линейно деформируемое полупространство, а как часть геологической среды, на которую действует внешнее силовое возмущение в виде нагрузки от фундамента. Геологическая среда находится в условиях компрессионного сжатия. Согласно законам физики, в воздушной и водной среде давление в точке вызывается соответственно 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.

Напряженно-деформированное состояние грунта в точке в условиях компрессионного сжатия характеризуется законом прочности Кулона-Мора [7, 9]:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_{str}} = tg^2 \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right), \tag{1}$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  — соответственно наибольшее и наименьшее главные напряжения;  $\sigma_{str}$  — структурная прочность грунта;  $\varphi$  — угол внутреннего трения грунта.

Структурная прочность  $\sigma_{str}$  определяется как предельное давление при испытании образца грунта на одноосное сжатие, характеризует прочность структурных связей грунта, прочность грунта как материала; аналитически выражается как:

$$\sigma_{str} = 2c \cdot tg \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right), \tag{2}$$

где  $c$  — сцепление грунта.

В грунтовом массиве от вертикального давления  $\sigma_{1i} = \gamma Z_i$  в каждой  $i$ -той точке массива (элементарном объёме грунта) на глубине  $Z_i$  возникает давление  $p_i$ , в соответствии с (1):

$$p_i = \sigma_{3,i} = (\sigma_{1,i} - \sigma_{str,i}) \cdot tg^2 \left( 45 - \frac{\varphi_i}{2} \right) \tag{3}$$

В геологической среде давление  $p_i$ , определяемое по выражению (3) для  $i$ -той точки, передается во все стороны, как и давление по закону Паскаля в газовой и водной средах. Таким образом, формируется статичное напряжённо-деформированное состояние (НДС) в грунтовом массиве с действием давления по (3), с учетом исходных геологических условий и совокупности других факторов, проявляющихся в каждой  $i$ -той точке массива.

**Диссипативные геологические структуры (ДГС) в грунтовом основании**

Установлено, что локальное внешнее силовое воздействие (оползневой очаг, подземная полость и др.) на геологическую среду вызывает возникновение процесса диссипации с образованием новых геологических структур [8, 9]. Геологическая среда создает ДГС как замкнутые крупные объемы грунта, которые предназначены для защиты от внешнего воздействия, локализации изменения НДС в границах ДГС и обеспечения сохранности исходного НДС за их пределами. В грунтовом основании при достижении предельных нагрузок под ленточным фундаментом образуются две симметрично расположенные геологические структуры ДГС<sub>2</sub> (рис. 1), похожие на зоны предельного равновесия, выделяемые в механике грунтов по теоретическим решениям и экспериментальным исследованиям [1, 2, 4, 5, 12]. В локальной части геологической среды, в зоне силового возмущения, происходит переход от исходного распределения напряжений в точках к распределению напряжений в основании образуемых ДГС, воспринимающих внешнее воздействие. Геологическая среда, в том числе грунтовое основание, находится в условиях компрессионного сжатия с формированием НДС по закону Кулона-Мора в главных напряжениях по (1), но в предельном состоянии рассматривается взаимодействие ДГС как отдельных крупных точек массива между собой и с объектом внешнего воздействия. Для ленточного фундамента основным параметром, определяющим размеры ДГС, является его ширина  $b$  [10]. Посредством ДГС геологическая среда предусматривает защиту исходного НДС в виде создания по границам оболочек, в грунтах которых происходит трансформация НДС, в соответствии с геологическим критерием 0,009 [10, 11],

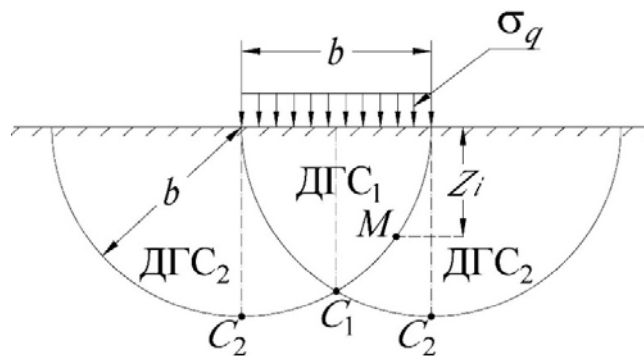


Рис. 1. Схема расположения диссипативных геологических структур в грунтовом основании под нагрузкой от ленточного фундамента шириной  $b$ .  $\sigma_q$  — давление на грунтовое основание под подошвой фундамента; ДГС<sub>1</sub> и ДГС<sub>2</sub> — диссипативные геологические структуры в грунтовом основании.



отделение и выпор структур при нагрузках, превышающих предельное значение.

При возникновении давления  $\sigma_q$  по подошве фундамента шириной  $b$ , в грунтовом основании полной перестройки НДС, с образованием указанных выше ДГС, не происходит до тех пор, пока нагрузка не достигнет предельного значения. Так, при изучении процессов образования и функционировании ДГС на участке подготовки оползневой блока установлено, что до возникновения предельного состояния коренного массива границы ДГС не проявляются. В коренном массиве у границы воздействия оползневого процесса (оползневого очага) сохраняется исходное НДС. Как и под ленточным фундаментом, в подготовке оползневой блока участвуют две ДГС. В средней части также образуется ядро, как ДГС<sub>1</sub>. Воздействие оползневого процесса проявляется в разгрузке напряжений в коренном массиве до базиса — нижней границы развития смещений. Ширина ядра по верхней площадке ДГС совпадает по величине с глубиной  $Z_a$  до базиса ДГС (как и под ленточным фундаментом) [11]. С достижением предельного состояния по уравнению равновесия сил на горизонте базиса дальнейшее изменение НДС проявляется с **возникновением граничной оболочки ядра и началом деформаций грунтов в ней по схеме скашивания, оседанием ядра**. Часто признаком появления новой границы (оболочки ядра ДГС) в коренном массиве является возникновение подпора грунтовых вод. Остальные граничные оболочки ДГС проявляются уже после того, когда деформации грунтов в оболочке (чаще только по тыловой границе ядра — границе отделения ДГС-блока) достигнут критического значения  $0,009 Z_a$ . Далее по поверхности сдвига в грунтах оболочки ДГС, захватывающей и верхнюю часть склона, происходит разрушительное смещение ДГС-блока [11].

Анализ процессов перестройки НДС геологической среды при формировании оползневой блока и развития зон пластических деформаций под ленточным фундаментом позволяет говорить о том, что ядро ДГС<sub>1</sub> образуется с началом деформаций грунтового основания (возникновением пластических деформаций по краям фундамента).

На схеме (рис. 1) представлены ДГС для предельного состояния грунтового основания. В центральной части грунтового основания под фундаментом, в зоне пересечения указанных диссипативных геологических структур, образуется ядро (ДГС<sub>1</sub>) в виде клина, в котором боковые образующие — дуги окружности радиусом, равным  $b$ . Соответственно нижняя точка ядра является вершиной равносто-

ронного треугольника со стороной  $b$ , а осевая часть имеет значение  $b \cdot \cos 60^\circ = 0,866 b$ .

Для ленточного фундамента уравнение предельного равновесия, в соответствии с рис. 1, имеет вид [10]:

$$\frac{\gamma b}{m} + \sigma_{str} = (0,866 \gamma b - \sigma_{str} + \sigma_{q,cr}) \cdot m,$$

и отсюда:

$$\sigma_{q,cr} = \gamma b \left( \frac{1}{m^2} - 0,866 \right) + \sigma_{str} \left( \frac{1}{m} + 1 \right), \quad (4)$$

где  $\gamma$  — среднее значение удельного веса грунтов основания толщи над горизонтом точек  $C_2$ ;  $b$  — ширина фундамента;  $\sigma_{str}$  и  $\varphi$  — соответственно структурная прочность и угол внутреннего трения грунта на уровне точек  $C_1$  и  $C_2$ ;  $m = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2)$  — коэффициент бокового распора;  $\sigma_{q,cr}$  — предельное значение давления на грунтовое основание под подошвой фундамента.

#### Закономерности и механизм развития деформаций и формирования осадки грунтового основания

Теоретические и экспериментальные исследования, данные мониторинга возникновения и развития ДГС при образовании оползневой блока, провала над подземной полостью и формирования зон выпора грунтового основания показали, что основной параметр ДГС (радиус кривизны её границ) определяет и толщину  $h$  оболочки ДГС, отделяющей её от остальной части геологической среды.

Для ленточного фундамента шириной  $b$  толщина грунтовой оболочки ДГС составит  $h = 0,009 b$ , для круглого фундамента диаметром  $b$  толщина оболочки меньше в два раза [10].

Фундамент создает давление на грунтовое основание и, соответственно, на ДГС<sub>1</sub>-ядро, в котором давление  $p_i$  в точке включает и текущее значение  $\sigma_{q,i}$  давления под фундаментом.

Внутри ДГС<sub>2</sub> давление в точках соответствует исходному НДС, т.е. значению  $p_i$  по выражению (3).

Результаты исследования процессов подготовки оползневой блока [7], формирования ядра под фундаментом [1, 4, 5] показали, что на допредельном этапе изменения НДС грунтового основания, связанные с ростом  $\sigma_{q,i}$  могут происходить в основном в грунтах оболочки ядра-ДГС<sub>1</sub>, где действующие напряжения повышаются за счёт действия давления фундамента. По-видимому, ядро как диссипативная геологическая структура ДГС<sub>1</sub> с граничной оболочкой, в которой возникает новое НДС, образуется при нагрузках, когда начинается фаза

сдвигов с проявлением пластических деформаций грунтов под краями фундамента [1, 12].

В соответствии с представлениями о функционировании ДГС, изложенными выше, увеличение давления  $\sigma_{q,i}$  вызывает оседание ДГС<sub>1</sub> и деформации грунтов в узкой зоне оболочки ядра по механизму скашивания (рис. 2). То есть допредельная осадка фундамента — это деформация грунта в оболочке ДГС<sub>1</sub>, смещение на величину  $\Delta l_i$  при оседании ДГС<sub>1</sub> вместе с фундаментом.

В соответствии с представленными геологическими основами расчёта осадки, НДС грунтового основания при предельном давлении  $\sigma_{q,cr}$  фундамента характеризуется следующим [10]:

- давление  $p_{1i}$  в точках ядра ДГС<sub>1</sub> равно:

$$p_{1i} = (\gamma Z_i - \sigma_{str,i} + \sigma_{q,cr}) \cdot \operatorname{tg}^2(45 - \frac{\varphi_i}{2}), \quad (5)$$

где  $Z_i$  — глубина от подошвы фундамента до  $i$ -того горизонта в ядре; в точках ДГС<sub>2</sub> (вне ДГС<sub>1</sub>) давление соответствует исходному состоянию, т.е. определяется по формуле (3);

- напряжения в оболочке геологических структур грунтового основания, определяющие его НДС, находятся в равновесии в соответствии с уравнением (4);
- угол поворота ДГС<sub>2</sub> составит  $\alpha_{cr} = h/b = 0,00901944$  радиана или  $\alpha_{cr} = 0^\circ 31'$ , что составляет  $\pi^3$  минут;
- угол скашивания грунтов в оболочке достигает  $45^\circ$ ;
- относительное значение деформации скашивания грунта в оболочке составляет:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{h}{b} = \frac{\Delta l_{cr}}{b} = 0,009, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{cr}$  и  $\Delta l_{cr}$  — относительное и абсолютное критическое значение деформации грунта в оболочке соответственно при достижении предельного давления фундамента на грунтовое основание.

С ростом давления  $\sigma_{q,i}$  на грунтовое основание увеличивается значение давления  $p_i$  на величину  $\sigma_{q,i}$  в точках ядра ДГС<sub>1</sub>. В крайних точках подошвы фундамента деформации грунта в оболочке практически определяют осадку фундамента, в соответствии с изменением НДС в грунтах оболочки ядра (ДГС<sub>1</sub>).

При достижении предельного состояния ( $\sigma_{q,i} = \sigma_{q,cr}$ ;  $S_i = \Delta l_{cr} = 0,009 b$ ) в механизме самоорганизации геологической среды предусмотрено, что по обе стороны ДГС<sub>1</sub> появляются границы ДГС<sub>2</sub>. В пределах новых границ локализуются зоны снижения напряжений (вследствие нагрузки от фундамента).

Дальнейший рост нагрузки от фундамента приводит к переходу механизма деформирования грунта в оболочке от «скашивания» к «сдвигу» по образованной поверхности в грунтах внутри оболочки. В связных грунтах переход к механизму сдвига в оболочке ДГС приводит к разрыву структурных связей (значения сцепления и структурной прочности грунта в оболочке снижаются до нуля).

Таким образом, при  $\sigma_{q,i} \geq \sigma_{q,cr}$  в оболочках ДГС<sub>2</sub> образуются поверхности скольжения (сдвига), происходит проседание ядра ДГС<sub>1</sub> и выпор вбок ДГС<sub>2</sub>.

Следует отметить, что на допредельном этапе состояния грунтового основания, когда  $\sigma_{q,i} < \sigma_{q,cr}$  абсолютные значения текущей осадки  $S$  фундамента при небольшой ширине фундамента могут быть весьма малы. Так при ширине ленточного фундамента  $b = 2$  м критическое значение осадки

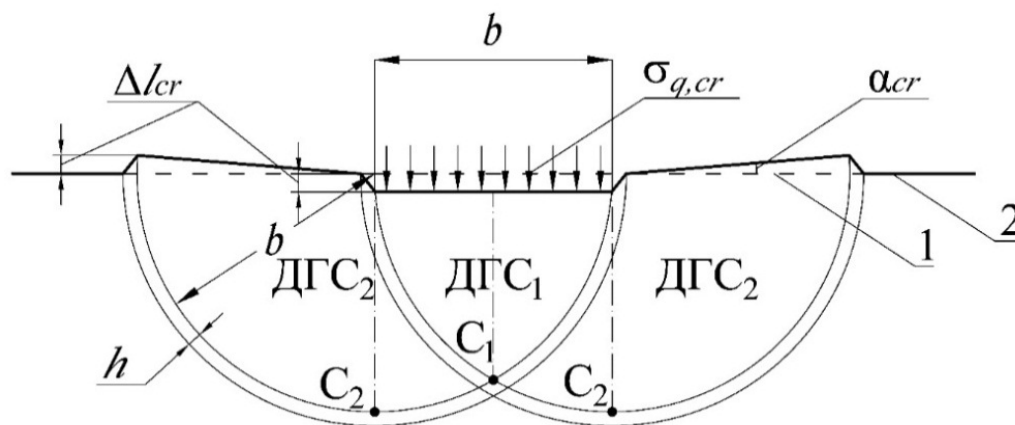


Рис. 2. Схема проявления ДГС и деформаций в оболочке ДГС при достижении предельного давления  $\sigma_{q,cr}$  на грунтовое основание. Осадка  $S_i = \Delta l_{cr}$  ленточного фундамента и смещение  $\Delta l_{cr} = h$  грунта в оболочке толщиной  $h$  по механизму скашивания при предельном давлении  $\sigma_{q,cr}$  на грунтовое основание.

составит  $S_{cr} = \Delta l_{cr} = h = 0,009 b = 0,018$  м, а текущие значения — ещё меньше, миллиметры.

Для определения предельной величины давления ленточного фундамента шириной  $b$  на грунтовое основание по уравнению (4) требуется информация по механическим свойствам грунтов на глубине  $Z \approx b$ , включая  $\gamma$ ;  $\varphi$ ;  $c$  и  $\sigma_{str}$ . Принимая линейную зависимость между давлением фундамента  $\sigma_q$  и относительной его осадкой на допредельном этапе состояния грунтового основания, можно определить текущее значение  $S_i$  осадки в соответствии с критерием (7) и графиком на рис. 3:

$$S_i = \Delta l_i = 0,009b \left( \frac{\sigma_{q,i}}{\sigma_{q,cr}} \right). \quad (7)$$

Итак, процедура определения осадки фундамента, в соответствии с изложенным выше, выглядит следующим образом:

- 1) по данным изысканий устанавливаются значения указанных выше механических свойств грунтов на глубине  $Z_i \approx b$ ;
- 2) вычисляется предельное давление  $\sigma_{q,cr}$  на грунтовое основание по уравнению (4);
- 3) устанавливается текущее значение  $\sigma_{qi}$  давления фундамента на грунтовое основание;
- 4) определяется величина осадки при текущем (проектном) значении давления фундамента  $\sigma_{qi}$  по выражению (7).

**Тестовый пример расчета осадки по изложенной методике**

В работах [6, 7] приведены результаты расчёта осадки по разным технологиям.

Объект — фундамент пятиэтажного дома в городе Новочеркасск.

Исходные данные [6]:

- место строительства: г. Новочеркасск;
- размеры площадки: 30.2 x 13.01 м;
- грунты основания: суглинки лессовидные средней плотности, маловлажные, мощность слоя — 4,5 м (глубины 0–4,5 м) и глины маловлажные, мощность слоя — 6,0 м (глубины 4,5–11,5 м) (табл. 1; 2);

**Таблица 1. Характеристика грунтов основания [6]**

Наименование грунта	Мощность слоя, м	Модуль деформации, МПа	Удельный вес, кН/м³
суглинки	4,5	10	17,4
глины	6	12	17,8

**Таблица 2. Характеристика физико-механических свойств грунтов [6]**

$W$	$I_p$	$I_L$	$e$	$\varphi_{пр}$ , град	$C_{пр}$ , кПа	Примечания
0,14...0,2	0,16...0,18	0,32...0,35	0,768...0,701	25...29	16...28	Вторые цифры относятся к большим глубинам

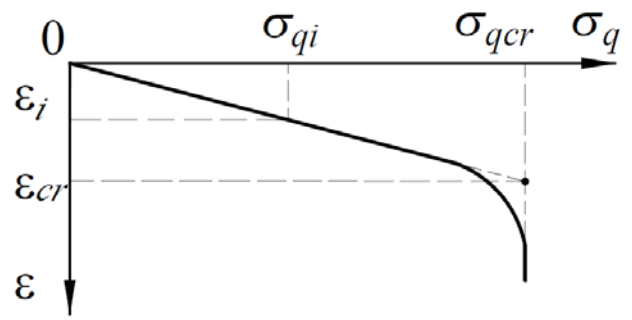


Рис. 3. Характерный график зависимости относительной осадки  $\epsilon$  от давления  $\sigma_q$  под подошвой фундамента.  $\epsilon_{cr}$  и  $\sigma_{q,cr}$  — критические значения (в предельном состоянии) соответственно осадки и давления;  $\epsilon_i$  и  $\sigma_{qi}$  — промежуточные значения осадки и давления.

- давление по подошве фундамента:  $\sigma_q = 133,6$  кПа;
- глубина заложения фундамента:  $h_0 = 1,6$  м;
- ширина подошвы фундамента:  $b = 2,0$  м;
- структурная прочность грунта:  $\sigma_{str} = 50$  кПа.

В работе [6] выполнены расчеты с использованием нормативного метода послойного суммирования (по программе ES1-OSA, авторы: С. И. Евтушенко и Г. М. Скибин) в пределах глубины сжимаемой толщи 4,0 м. Величина осадки фундамента составила **S = 1,29 см**.

Также в работе [6] приведены результаты расчетов по формуле для малозаглубленных фундаментов, учитывающей структурную прочность грунта, предложенной О.Н. Осиповой и В. П. Дыба. Расчеты тоже выполняются путем послойного суммирования. Получено: суммарная осадка **S = 0,7 см**.

В ИГЭ РАН ранее была разработана новая технология расчета осадки также с использованием послойного суммирования. В ней учтены структурная прочность грунта каждого слоя, образование в грунтовом основании ядра в виде полукруга радиусом  $b/2$  (в вертикальном сечении) и развитие деформаций именно по границам ядра [7]. В соответствии с результатами расчетов по указанной технологии, представленными в работе [7], осадка фундамента шириной 2,0 м составила **S=0,92 см**.

### Расчеты осадки по методике, учитывающей образование в грунтовом основании диссипативных геологических структур

Исходные данные: ширина фундамента  $b = 2,0$  м; грунтовое основание представлено суглинками до глубины 4,5 м; структурная прочность  $\sigma_{str} = 50$  кПа (по исходным данным); удельный вес  $\gamma = 17,4$  кН/м<sup>3</sup>; угол внутреннего трения  $\varphi = 25^\circ$ ; соответственно  $m = tg^2(45 - \varphi/2) = 0,406$ ; сцепление  $c = 16$  кПа;  $\sigma_{q,i} = 133,6$  кПа;  $m^2 = 0,165$ .

Определяется по (4)  $\sigma_{q,cr} = \gamma b(1/m^2 - 0,866) + \sigma_{str}(1/m + 1) = 353,8$  кПа.

Расчетное значение осадки  $S_i$  фундамента по формуле (7):

$$S_i = 0,009 \cdot b \cdot \sigma_{q,i} / \sigma_{q,cr} = 0,0068 \text{ м. Или } S_i = 0,68 \text{ см.}$$

Таким образом, расчеты осадки по предложенной методике дали результаты, близкие к данным, полученным по другим методикам, в том числе основанным на послойном суммировании осадок при уплотнении грунтов.

Следовательно, предложенная методика, основанная на новых геологических закономерностях трансформации НДС грунтового основания с образованием в нем крупных структур, согласно проведенным разовым тестовым расчётам осадки, показала работоспособность.

Выполнен также расчетный анализ влияния изменения значений исходных параметров на оценку осадки. Принималось изменение исследуемого параметра на 5% (табл. 3).

Получено, что наибольшее влияние на результаты расчетов оказывают изменения исходных значений угла внутреннего трения. Увеличение (уменьшение) значения  $\varphi$  на 5% вызывает изменение осадки на 7% (в расчете исходное значение осадки 0,68 см изменялось на 0,05 см). Этому есть свое

объяснение. Угол внутреннего трения участвует в значениях  $m$  и  $m^2$  в обоих слагаемых в формуле (4) оценки предельного состояния. Действительно, процесс деформирования грунтового основания происходит в грунтах оболочки ДГС — узкой зоне, толщина которой составляет  $0,009b$ . Основной механизм деформирования — скашивание грунта при повороте ДГС. В этом случае параметры, определяющие сопротивление трению грунта, являются также определяющими в оценке НДС грунтов оболочки и, соответственно, деформируемости грунтового основания.

### Заключение

При изучении закономерностей проявления и развития оползней различных типов, установлено, что подготовка нового оползневого блока происходит в виде самоорганизации геологической среды по защите своего исходного состояния от оползневой угрозы (внешнего воздействия). Геологическая среда образует новые крупные структуры (ДГС) с граничными оболочками, ограничивающими область снижения напряжений (давления в точках), запускает механизм взаимодействия с оползневым процессом путём функционирования ДГС и при достижении предельного состояния — отделения ДГС как оползневого блока.

В ИГЭ РАН также рассмотрены механизмы защитной реакции геологической среды с образованием соответствующих ДГС при образовании провала над подземной полостью и выпора грунта из-под подошвы фундамента.

В статье процедурой расчёта осадки предусматривается, что, в соответствии с параметрами фундамента и данными о прочности грунтов, расчётом определяются, с учётом закономерностей защитной реакции геологической среды, предельные значения

**Таблица 3. Результаты расчета по формулам (4) и (7) осадки фундамента при изменении одного из расчетных параметров на 5% при исходных значениях остальных**

Измененный на 5% параметр	Значения параметров в расчете							
	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	$b$ , м	$\varphi$ , град.	$m$	$\sigma_{str}$ , кПа	$\sigma_{q,cr}$ , кПа	$S_p$ , см	$\Delta S_p$ , см
0,95 $\varphi$ 1,05 $\varphi$	17,4	2	23,75	0,426	50	329,5	0,73	+0,05
	17,4	2	26,25	0,386	50	382,4	0,63	-0,05
0,95 $\sigma_{str}$ 1,05 $\sigma_{str}$	17,4	2	25	0,406	47,5	345,3	0,70	+0,02
	17,4	2	25	0,406	52,5	362,6	0,66	-0,02
0,95 $\gamma$ 1,05 $\gamma$	16,53	2	25	0,406	50	344,9	0,70	+0,02
	18,27	2	25	0,406	50	363,0	0,66	-0,02
0,95 $b$ 1,05 $b$	17,4	1,9	25	0,406	50	344,9	0,66	-0,02
	17,4	2,1	25	0,406	50	363,0	0,70	+0,02

давления фундамента и осадки грунтового основания. Текущая осадка устанавливается расчётом при допущении линейной зависимости между осадкой и давлением на этапе допредельного состояния грунтового основания.

Результаты тестового примера расчета осадки ленточного фундамента показали, что предлагаемая методика, основанная на природном механизме трансформации НДС грунтового основания с образованием диссипативных геологических структур при достижении предельного давления фундамента,

может применяться, что стимулирует продолжение исследований в данном направлении. В дальнейшем необходимо проведение экспериментальных исследований по выявлению признаков проявления в грунтовом основании диссипативных геологических структур, их оболочек, изменений НДС в грунтах новых образований на этапах допредельного и предельного состояний, изучению особенностей защитной самоорганизации геологической среды при оценке несущей способности и осадки грунтового основания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабков В. Ф., Безрук В. М. Основы грунтоведения и механики грунтов. М., Высшая школа, 1976. 328 с.
2. Далматов Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Л., Стройиздат, 1988. 415 с.
3. Кашперюк П. И., Лавруевич А. А., Мартынов А. М. К вопросу о рассмотрении осадки грунтов основания как многофакторного антропогенно обусловленного геологического процесса // Грунтоведение, 2021, №2, С. 29–35.
4. Малышев М. В. Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений. М. Стройиздат, 1980. 136 с.
5. Ольховатенко В. Е., Тимофеев В. С. Нелинейная модель грунтового основания // Инженерная геология. 1992. №6. С. 96–106.
6. Осипова О. Н. Формула для расчета осадки методом послойного суммирования с учетом влияния структурной прочности // Городские агломерации на оползневых территориях. Матер. V междунар. конф. по геотехнике. Волгоград: ВолгГАСУ, 2010. С. 261–264.
7. Постоев Г. П. Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). М.; СПб.: Нестор-история, 2013. 100 с.
8. Постоев Г. П. Модели механизма формирования и расчёта провалов земной поверхности над подземными полостями // Геоэкология, 2020. №4. С. 36–47.
9. 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.
10. Постоев Г. П. Диссипативные геологические образования и модели оценки предельного состояния грунтовых оснований // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2021. № 2. С. 41–48.
11. Постоев Г. П., Кучуков М. М., Казеев А. И. Поведение грунтов и диссипативных геологических структур при образовании оползневого блока // Грунтоведение, 2022, №2, С. 58–64.
12. Цытович Н. А. Механика грунтов. Изд. 4. М., Госстройиздат, 1963. 636 с.

DOI 10.53278/2306-9139-2023-2-21-36-43

УДК 624.131.43

## ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОРОД КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РАЙОНАХ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ДУГИ

## HYDROTHERMAL ALTERATION OF ROCKS AS A FACTOR OF LANDSLIDE DEVELOPMENT IN GEOTHERMAL AREAS OF THE KURIL-KAMCHATKA VOLCANOIC ARC

Ю.В. Фролова<sup>1</sup>, О.В. Зеркаль<sup>2</sup>, И.Е. Большаков<sup>3</sup>  
J.V. Frolova, O.V. Zerkal, I.E. Bolshakov

*Геологический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,  
Ленинские горы, д. 1, Москва, 119234, Россия*  
*Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, 119234 Moscow, Russia*

ju\_frolova@mail.ru<sup>1</sup>, igzov@mail.ru<sup>2</sup>, bolshakov.ilya.210@yandex.ru<sup>3</sup>

**Аннотация.** В статье рассматриваются особенности формирования оползней в геотермальных районах Курило-Камчатской вулканической дуги. Наиболее распространены мелко-среднемасштабные оползни скольжения и течения; гораздо реже происходят крупномасштабные комплексные оползни, однако именно они оказывают наиболее значительное воздействие на геологическую среду. Сделано заключение, что одним из первостепенных факторов развития оползней в регионах с высокой вулканической активностью является гидротермальная переработка пород, слагающих склоновый массив. В наибольшей степени на устойчивость склона влияет гидротермальная аргиллизация, которая, развиваясь на отдельных участках массива, вызывает снижение прочности пород на 2–3 порядка.

**Abstract:** The article discusses the landslides formation in geothermal areas of the Kuril-Kamchatka volcanic arc. The most common are small- to medium-size slides and earthflow; large-scale complex landslides occur much less frequently, but they have the most significant impact on the geological environment. It was concluded that one of the primary factors in the landslides development is hydrothermal alteration of rocks composing the slope massif. Hydrothermal argillization affects the stability of the slope to the greatest extent, since, developing in certain areas of the massif, it causes a decrease in the strength of rocks by 2–3 orders of magnitude.

**Ключевые слова:** оползни, геотермальный район, гидротермальная аргиллизация, физико-механические свойства, прочность, Курило-Камчатская вулканическая дуга.

**Keywords:** landslides, geothermal region, hydrothermal argillization, physical-mechanical properties, strength, Kuril-Kamchatka volcanic arc.

### Введение

На Земле существует ряд регионов, в пределах которых проявлено максимальное разнообразие геологических процессов, в том числе, и катастрофических. В России таким регионом является Курило-Камчатская вулканическая дуга, для которой характерны высокая сейсмическая активность, вулканические извержения, цунами, геотермальная деятельность, а также масштабные экзогенные процессы — гравитационные, эрозионные и иные. Некоторые проявления этих процессов представляют серьезную опасность для территорий, перспективных с точки зрения социально-экономического развития региона.

В настоящее время заметно возрос интерес к геотермальным районам, что обусловлено, во-первых, мировой потребностью в использовании нетрадиционных видов энергетических и тепловых ресурсов, соответственно, развитием геотермальной энергетики, а во-вторых, развитием туризма. На территории Камчатки и Курильских островов разведаны десятки геотермальных месторождений, построено несколько тепловых и электрических станций, функционируют рекреационные зоны и тепличные хозяйства, проложены туристические маршруты. Следует упомянуть, что с 2014 г. в стране реализуется «Комплексная государствен-

ная программа по социально-экономическому развитию Дальневосточного федерального округа». При инженерно-хозяйственном и туристическом освоении геотермальных районов требуется целый комплекс мероприятий, прежде всего необходима оценка инженерно-геологических условий соответствующих территорий, в том числе, оценка опасности от возникающих геологических процессов.

Геотермальные площади представляют собой геодинамически активные объекты, на которых постоянно происходят изменения инженерно-геологических условий: меняется рельеф, активизируются обвально-оползневые и эрозионные процессы, наблюдаются деформации поверхности, миграция термопроявлений, гидротермальные взрывы, изменение напряженно-деформированного состояния и иные [14]. Это отмечается многими специалистами для различных геотермальных районов не только Курило-Камчатского региона, а также Италии, Исландии, Филиппин, Индонезии, Японии, США, Мексики, Новой Зеландии и многих других стран — потребителей геотермальной энергии. Данные процессы происходят как в ходе естественной эволюции гидротермальных систем, так и вследствие техногенных факторов, возникающих при освоении и эксплуатации геотермальных месторождений.

Среди происходящих на геотермальных площадях процессов наиболее масштабное воздействие на геологическую среду оказывают оползни. Известно немало случаев, когда оползни наносили экономический ущерб, нарушая работу эксплуатационных и реинжекционных скважин, повреждая сооружения геотермальных станций, и даже приводили к человеческим жертвам. Вопросам их формирования и развития посвящены многочисленные работы по термальным полям Филиппин [17], Индонезии [9, 16, 20], Италии [10], США [18], а также Камчатского полуострова [1–3, 5, 11, 15, 19].

Цель данной работы — исследовать оползни, формирующиеся в геотермальных районах Курило-Камчатского региона, выявить их основные типы и механизмы смещения, а также установить специфические особенности, связанные с гидротермальной деятельностью.

### **Краткий обзор оползней в геотермальных районах**

Одним из первых на проблему влияния современной гидротермальной активности на развитие оползневых процессов обратил внимание Н. Б. Кроу, изучая гейзеры района озера Клир (штат Калифорния, США) [8].

Большое внимание оползневых процессам в вулканических районах уделял в своих рабо-

тах Б.Войт [19]. Он выделил в отдельную группу склоновые процессы, происходящие в геотермальных районах, и указал, что среди них могут быть оползни как малого и среднего масштаба, так и гигантские катастрофические. Среди факторов формирования оползней особо подчеркивается роль гидротермальной переработки пород, в том числе, наличие слабых глинистых прослоев, гидратация глинистых минералов, выщелачивание первичных минералов и растворение цемента и пр., что значительно ослабляет присклоновые участки массивов и приводит к их обрушению.

Началу изучения катастрофических проявлений склоновых процессов в районах эксплуатации геотермальных ресурсов в большой степени способствовал оползень объемом более 800 тыс. м<sup>3</sup>, произошедший в 1991 г. на геотермальном месторождении Зунил I в западной Гватемале, обеспечивавшим работу электростанции мощностью 10,8 МВт [12; 19]. Обрушение склона привело к гибели 23 человек и разрушению нескольких ферм.

Проблема развития оползневых процессов в геотермальных районах остро стоит на Филиппинах. Здесь оползни неоднократно повреждали здания геотермальных электростанций, дороги, трубопроводы, линии электропередач, в связи с чем специалисты «Корпорации по развитию энергетики» исследуют специфику формирования оползней и проводят оценку опасности обрушения склонов [17]. На основании результатов исследований был сделан вывод, что помимо «классических» факторов, приводящих к обрушению склонов, не менее важным фактором является присутствие в геологическом разрезе измененных вулканогенных пород и гидротермальных глинистых отложений, а также — наличие на склоне термопроявлений в виде парогазовых струй и грязевых котлов. Филиппинскими специалистами осуществляется мониторинг за состоянием склонов, разработана специальная методика оценки оползневой опасности и комплекс защитных инженерных мероприятий по снижению воздействия оползней окружающую среду и инженерную инфраструктуру.

Многочисленные оползни характерны для термальных полей Индонезии, где они регулярно наносят экономический ущерб. Наглядным примером недоучета влияния активных гидротермальных процессов, сопровождавшихся катастрофическими последствиями, является прорыв высокотемпературных ( $T=80-90^{\circ}\text{C}$ ) грязевых масс в Поронге (Восточная Ява) в 2006 г., спровоцированный бурением эксплуатационной скважины. Прорыв грязевых масс привел к разрушению на прилегающих территориях более 10 тыс. домов в 12 населенных пунктах.

В 2013 г. в геотермальном районе Камоянг (Западная Ява) произошел оползень объемом 33 тыс. м<sup>3</sup>, нарушивший работу реинжекционной скважины. Оползень сформировался в аргиллизированных андезитах; по характеру движения он являлся комплексным: сформировавшись как оползень скольжения, по мере движения оползневых масс, сопровождавшегося фрагментацией и дроблением обломочного материала, он трансформировался в оползень-поток, причем поверхность скольжения оказалась приурочена к горизонту гидротермальных глинистых грунтов [20]. Всего за последнее время в этом районе зафиксировано 28 оползней, сформированных в гидротермально измененных вулканических породах. В настоящее время осуществляется международный проект по выявлению причин обрушений вершинного лавового купола на вулкане Мерапи (о. Ява) [9]. Проведя комплексный мониторинг, ученые установили, что обрушения происходят благодаря скрытой зоне гидротермально измененных пород, для которых характерны высокая пористость и пониженная прочность.

Оползни широко развиты на участках геотермальной активности Италии. Например, многочисленные оползни характерны для вулканического острова Искья. Здесь в течение голоценового времени происходили оползни различных типов и масштабов — от мелких поверхностных до глубоких оползней скольжения и крупных обвалов [10]. Образование оползней исследователи связывают с вулканотектонической активностью региона, а также с интенсивной гидротермальной деятельностью, которая привела к переработке отдельных горизонтов вулканических пород и снижению их прочностных и деформационных свойств. В результате, блоки неизмененных вулканических пород сползают по подстилающим их интенсивно аргиллизированным туфам либо обрушаются из-за быстрого выветривания последних.

Многими специалистами, изучающими оползни в геотермальных районах, отмечается, что их формирование часто происходит без каких-либо триггеров в виде сейсмических событий или аномального количества атмосферных осадков, а одним из основных факторов является ослабление пород вследствие гидротермальной переработки.

### Геологические условия

Камчатский полуостров и Курильские острова находятся на участке перехода «океан — континент» северо-западного сегмента Тихоокеанского «огненного кольца» — одной из самых динамичных зон Земли. Обычно они рассматриваются как единая крупная островодужная система, относящаяся

к области кайнозойской складчатости, характеризующаяся наличием таких общих на всем ее протяжении элементов, как сейсмофокальная зона, глубоководный желоб, высокая вулканическая и тектоническая активность. Повышенный конвективный тепловой поток в пределах Курило-Камчатской вулканической дуги связан с ее тектонической позицией над зоной субдукции. В общем случае, геологические, гидрогеологические и геотермические условия региона благоприятны для формирования гидротермальных систем, однако пространственное распределение геотермических условий крайне неоднородно. Преобладающее число гидротермальных систем расположено в пределах Восточного вулканического пояса, включая Южную Камчатку, и на Большой Курильской гряде. Обычно они приурочены к местам пересечения разломов и располагаются группами, образуя геотермальные районы. В локальном плане большинство из них приурочены к вулканотектоническим депрессиям или сложнопостроенным вулканическим массивам четвертичного возраста, отличающимся многофазовым вулканизмом и наличием экструзивных тел кислого состава. Вмещающими породами гидротермальных систем являются вулканические и вулканоогенно-осадочные образования неоген-четвертичного возраста.

### Фактический материал и методика исследования

Исследования проводились на девяти гидротермальных системах, две из которых расположены на Курильских о-вах (вулкана Баранского, о. Итуруп и Северо-Парамуширская, о. Парамушир), семь — на Камчатском полуострове (Паужетская, Камбальные термальные поля, Кошелевская, Мутновская, Больше-Банная, Гейзерная, Семейчинская) (рис. 1). Большая часть работ проводилась совместно с Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (в частности, с лабораторией геотермии). Образцы отбирались из керна скважин (максимальной глубиной до 1600 м), естественных обнажений и шурфов, пройденных на термальных полях. Всего исследовано более 1300 образцов.

Лабораторные исследования включали изучение структурно-минералогических особенностей пород методами оптической и электронной микроскопии (аналитик ст.н.с. М.С. Чернов), рентгеновской дифрактометрии (аналитики с.н.с. В.В. Крупская, ст. преп. В.Л. Косоруков) и определение показателей различных свойств — физических и физико-механических (прочностных и деформационных). Для большей части образцов определялись следующие показатели: плотность, плотность твердых частиц,



пористость, величина водопоглощения, скорости распространения упругих волн, динамические модуль упругости и коэффициент Пуассона, прочность на одноосное сжатие и растяжение, коэффициент размягчаемости, сцепление и угол внутреннего трения. Экспериментальные исследования осуществлялись в соответствии с национальными стандартами. Подробная методика определений изложена в работе [6].

### **Оползневые процессы и явления в геотермальных районах Курило-Камчатской вулканической дуги**

Оползневые процессы и их проявления широко распространены в геотермальных районах Курило-Камчатской дуги. Во многом это связано с сильно расчлененным горным рельефом, активной тектоникой и высокой сейсмичностью соответствующих территорий; кроме того, их развитию способствует климатический фактор, поскольку регион относится к категории избыточно увлажненных. Вместе с тем, имеется определенная специфика в особенностях формирования оползней геотермальных регионов. Это обусловлено, во-первых, гидродинамическим эффектом, который оказывают циркулирующие в массиве термальные флюиды, а во-вторых, масштабными преобразованиями пород, сопровождающимися существенным изменением их физико-механических свойств.

### **Изменение физико-механических свойств пород под действием гидротермальной аргиллизации**

С инженерно-геологической точки зрения наиболее опасным процессом является гидротермальная аргиллизация, поскольку развитие глинистых минералов сопровождается значительным разуплотнением пород и резким снижением их прочностных и деформационных свойств [13]. Под «аргиллизацией» понимается метасоматическое замещение исходных пород глинистыми минералами. Считается, что она сопряжена с завершающими этапами развития гидротермального процесса [4]. Обычно аргиллизиты формируются в условиях малых глубин и низких температур ( $T=50-150^{\circ}\text{C}$ ). В зависимости от условий формирования вторичных минералов выделяют несколько фаций аргиллизитов: цеолит-сметитовую, сметитовую, каолинит-сметитовую, каолинитовую, опал-каолинитовую, алунитовую, моноопалитовую. Аргиллизация может захватывать большие объемы пород, распространяясь на глубину до нескольких сотен метров, однако наиболее интенсивные преобразования происходят в пределах современных термальных полей, в местах разгрузки гидротерм на поверхности.

Процесс аргиллизации вулканогенных пород был исследован на термальных полях Кошелевского вулканического массива, Камбального хребта, Паужетской, Мутновской, Больше-Банной, Гейзерной гидротермальных систем, вулкана Баранского. Вследствие высокой динамичности и изменчивости протекающих процессов, прочные вулканические массивы трансформируются в пространственно-неоднородные толщи гигроскопичных, пластичных, повышено-сжимаемых, в некоторых случаях набухающих глинистых грунтов, для которых характерны сильная изменчивость минерального состава даже в пределах небольших объемов пород, большое количество кремнистых минералов, «пропитывающих» глину, включения неразложившихся реликтов исходных пород, что в конечном итоге отражается на их свойствах.

На макроуровне аргиллизация начинается по зонам трещиноватости в массиве вулканитов, являющихся наиболее проницаемыми для флюидов (рис. 2). С поверхности стенки трещин быстро перерабатываются и покрываются глинистыми пленками. Постепенно трещины расширяются, появляются новые, и аргиллизация захватывает все большие участки, проникая вглубь массива. В конечном итоге, глинистая масса практически полностью «съедает» вулканический массив, в котором остаются лишь отдельные реликты исходных пород. Толща гидротермальных глин отличается сильной неоднородностью, поскольку она содержит не полностью переработанные фрагменты исходных пород, и характеризуется унаследованной псевдоморфной структурой.

Если перейти на микроуровень, то можно видеть, как изменяются компоненты пород (рис. 2). Преобразования начинаются с вулканического стекла как самого термодинамически неустойчивого компонента вулканогенных пород. На микрофотографиях РЭМ видно, как изначально гладкая поверхность вулканического стекла становится чешуйчатой, вследствие развития глинистых минералов. Постепенно процесс аргиллизации распространяется на весь объем, и плотное вулканическое стекло превращается в пористые смектиты с ячеистым микростроением, вероятно в ассоциации с минералами кремнезема. Микролиты также претерпевают преобразования. В неизмененных эффузивах они имеют правильную идиоморфную форму с четкими очертаниями. При аргиллизации меняется их морфология, острые углы кристаллов сглаживаются, они приобретают ксеноморфные очертания, поверхность становится неровной, «изъеденной». В результате гидротермальных преобразований основная масса эффузивов, первоначально

состоящая из вулканического стекла и микролитов, постепенно преобразуется в смектит-кремнеземное вещество. Изменение фенокристаллов начинается по трещинам спайности и иным микротрещинам, включениям вулканического стекла, а также прочим дефектам в структуре кристалла, постепенно распространяясь на весь его объем в виде псевдоморфоз.

При аргиллизации одновременно с минеральными преобразованиями происходит растрескивание пород. Этому могут способствовать термические напряжения, возникающие при нагревании пород, чередование избыточного увлажнения и относительного высыхания, а также расклинивающее давление, оказываемое формирующимися глинистыми минералами (возможно, давление набухания минералов смектитовой группы). С увеличением степени аргиллизации интенсивность трещиноватости возрастает и массив постепенно распадается на отдельные блоки, фрагменты и обломки.

Структурно-минералогические преобразования сопровождаются разуплотнением пород, увеличением пористости и резким снижением прочностных и деформационных свойств (рис. 2). В процессе гидротермальной аргиллизации вулканогенных пород (андезибазальтов, андезитов, андезидацитов) снижается плотность воздушно-сухого грунта  $\rho_{d\text{cp}}$ : неизменные  $2,66 \text{ г/см}^3 \rightarrow$  слабоизмененные  $2,56 \text{ г/см}^3 \rightarrow$  среднеизмененные  $2,32 \text{ г/см}^3 \rightarrow$  сильноизмененные  $2,02 \text{ г/см}^3 \rightarrow$  глины  $0,57\text{--}1,36 \text{ г/см}^3$  и увеличивается пористость  $n_{\text{cp}}$ :  $5\% \rightarrow 6\% \rightarrow 15\% \rightarrow 25\% \rightarrow 41\text{--}79\%$ . Закономерно, что разуплотнение породы, повышение пористости и формирование глинистых минералов существенно влияют на показатели прочностных и деформационных свойств. Модуль упругости уменьшается в 3–4 раза — от 45,3–64,8 ГПа (неизменные и слабоизмененные вулканыты) до 10,5–21,7 ГПа (сильноизмененные вулканыты); прочность на одноосное сжатие снижается в среднем в 7 раз, а при трансформации в глины — на три порядка. Показатели прочностных свойств коррелируют с содержанием глинистых минералов, причем данная зависимость проявлена в большей степени для прочности на разрыв и сцепления и в меньшей степени для прочности на одноосное сжатие. Так, на Нижне-Кошелевском термальном поле с увеличением количества глинистых минералов от 2–3% до 30–35% прочность на разрыв андезитов снижается от 19–24 до 4–6 МПа (коэффициент корреляции  $r=-0,96$ ), а сцепление — от 30–32 до 5–10 МПа ( $r=-0,93$ ). При трансформации вулканогенных пород в глины сцепление уменьшается на два-три порядка, угол внутреннего трения в 2–3 раза.

Таким образом, гидротермальная аргиллизация сопровождается разуплотнением, формированием вторичной пористости и трещиноватости, а также резким снижением прочностных и деформационных свойств, вплоть до превращения прочных массивов вулканических пород в специфические сильно аргиллизированные или глинистые толщи. Это является одной из главных причин перераспределения напряжений в склоновом массиве, что в конечном итоге приводит к потере его устойчивости и способствует активизации оползневых процессов.

### Типы оползней

Многолетние полевые работы в геотермальных районах показали, что оползни различных типов и масштабов происходят практически на всех термальных полях и прилегающих территориях, приуроченных к склонам вулканических массивов или бортам речных долин, сложенных гидротермально измененными породами. Среди них наиболее часто встречаются мелко-среднемасштабные оползни — скольжения и течения, гораздо реже происходят крупномасштабные склоновые смещения со сложным механизмом.

**Крупномасштабные оползни** имеют наибольшую известность и оказывают значительное воздействие на геологическую среду. Ярким примером является оползень в Долине Гейзеров, произошедший в 2007 г. (рис. 3). Его объем составил порядка 20 млн  $\text{м}^3$  [21]. Оползень перекрыл реку Гейзерную, образовав завальную плотину и подпрудное озеро, разрушил или изменил режим ряда гейзеров, разрушил вертолетные площадки и хозяйственные постройки и только по счастливой случайности не привел к человеческим жертвам. Его изучению посвящен ряд работ [1–2, 5, 15], в том числе и авторов [11, 21]. Установлено, что помимо «классических» причин, способствующих возникновению оползня, дополнительным важным фактором явилась интенсивная гидротермальная аргиллизация пород, слагающих склон, что вызвало резкое снижение прочностных свойств, вплоть до формирования в массиве отдельных горизонтов и линз гидротермальных глин [7, 11, 13]. Детальное изучение разреза в стенке оползневого цирка показало, что толща сложена высокопористыми пемзовыми и витрокластическими туфами верхнего неоплейстоцена, причем в верхней части они не несут следов изменения, а нижняя часть вмещает термальные воды и поэтому в значительной степени аргиллизирована и цеолитизирована. В зонах разломов, отличающихся интенсивной трещиноватостью и брекчированностью пород и, соответственно, повышенной проницаемостью для

термальных растворов, туфы полностью трансформируются в гидротермальные глины. Так, в распадах, пересекающих стенку отрыва, и вероятно, приуроченных к зонам разломов, наблюдаются линзы и прослой гидротермальных глин, заключенные в туфогенную толщу (рис. 4). Превращение туфов в глины вызывает закономерное разуплотнение и разупрочнение: удельное сцепление снижается на один-два порядка (туфы:  $C_{\text{ср}}=2,06$  МПа (сухие), 0,73 МПа (водонасыщенные); глины:  $C_{\text{ср}}=0,02$  МПа), угол внутреннего трения уменьшается в 2–3 раза (туфы:  $\varphi_{\text{ср}}=45^\circ$ ; глины:  $\varphi_{\text{ср}}=19^\circ$ ) [7]. Таким образом, горизонты аргиллизированных вулканитов и новообразованных гидротермальных глин представляют собой наиболее ослабленные участки массива, и с учетом падения слоев в направлении склона можно предположить, что именно в этих горизонтах сформировалась поверхность скольжения. По-видимому, начальная фаза деформаций заключалась в переходе части водонасыщенных аргиллизированных туфов, залегающих на глубинах около 50–70 м, в вязкопластичное состояние с последующим отчленением и смещением крупного блока склонового массива.

Другое крупное обрушение произошло в 2014 г. в левом борту реки, выше по течению от основного участка с гейзерами (рис. 5). При обрушении склона образовалась каменная лавина ( $L \sim 1,5$  км), отложения которой перекрыли русло реки, образовав завальную плотину и подпрудное озеро [21]. Лавина уперлась в противоположный борт и развернулась вдоль русла реки. Она поспособствовала образованию грязекаменного потока, который устремился вниз по течению реки. В отличие от оползня 2007 г., когда обрушились ослабленные аргиллизацией туфы, в этом случае обрушился край лавового потока, сложенный прочными риодацитами ( $\rho=2,26$  г/см<sup>3</sup>;  $R_c \sim 50$  МПа, по [11]). Обрушению во многом способствовали трещины в лавовом потоке, ориентированные параллельно склону, которые отмечались на аэрофотоснимках еще в 1970-е годы [3]. Другим, не менее важным фактором, явилась интенсивная гидротермальная деятельность на склоне в виде разгрузки кислых парогазовых струй с температурой более 100°C. В результате в средней и нижней частях склона сформировалась ослабленная зона гидротермально измененных пород. Соответственно, эти породы активно разрушались вследствие эрозионной деятельности реки и ручьев, выветривания, мелкомасштабных гравитационных процессов, что постепенно ослабляло основание всего массива и привело к обрушению его верхней части.

Помимо крупномасштабных событий, в Долине гейзеров постоянно происходят обвальное-оползне-

вые процессы меньшего масштаба. Среди них многочисленные мелкие приповерхностные оползни скольжения, формирующиеся по бортам речной долины в гидротермально измененных туфогенных породах и гидротермальных глинах. Помимо гидротермальной переработки их образованию способствуют полости от каналов и камер гейзеров, которыми пронизан склон. Вдоль оползневого цирка 2007 г. постоянно происходят обвалы и камнепады. На поверхности оползневых отложений 2007 г. возникают вторичные оползни-потоки. По руслу р. Гейзерной и ее притокам нередко проходят грязекаменные потоки. Следует обратить внимание, что ежегодно Долину Гейзеров посещают тысячи туристов. Вместе с тем, это одно из самых опасных мест на Камчатке из-за интенсивного развития оползневых процессов.

**Оползни мелкого и среднего масштаба** имеют наиболее широкое распространение на термальных полях и окружающих территориях. Преимущественно это приповерхностные оползни, среди которых по механизму смещения выделяются оползни скольжения и оползни течения (рис. 6).

*Оползни скольжения* (блокового типа) образуются в сильно аргиллизированных вулканитах или плотных гидротермальных глинах, для которых характерно высокое содержание вторичных кремнистых минералов, а также реликтовые остатки первичных минералов, что придают им определенную жесткость. У них обычно хорошо выражены морфологические элементы — стенка отрыва, поперечные трещины и оползневое тело нередко сложного строения.

*Оползни течения* представляют собой вязкопластические оползни-потоки, которые образуются в результате смещения увлажненных пластичных глинистых грунтов по подстилающему их прочному «скальному основанию», сложенному вулканогенными породами. Мощность оползневых отложений обычно не превышает первых метров. Сценарии их формирования могут быть различны. В одних случаях это медленный процесс с постепенным развитием пластических деформаций, в других — быстрое смещение в результате разжижения водонасыщенных глинистых грунтов, иногда вследствие сейсмического события. Они могут происходить даже на пологих склонах.

По долинам ручьев встречаются отложения долинных (канализированных) оползней-потоков, грязевых и грязекаменных потоков, которые формируются при сильном увлажнении гидротермальных глинистых отложений в результате снеготаяния или обильных атмосферных осадков с последующим их смещением в виде потоков.

**Заключение**

Обобщив данные по различным геотермальным районам Курило-Камчатского региона, становится очевидным, что при их освоении необходимо учитывать повышенную вероятность возникновения опасных склоновых процессов, связанных с аргиллизацией и ослаблением пород при гидротермальной переработке, выступающей как один из факторов оползнеобразования.

Наиболее распространены мелко-среднемасштабные оползни скольжения и течения; гораздо реже происходят крупномасштабные оползни со сложным механизмом смещения, однако именно они оказывают наиболее значительное воздействие на геологическую среду.

Сделано заключение, что одним из ведущих факторов развития оползней является гидротермальная переработка пород, слагающих склоновый массив, причем в наибольшей степени на устойчивость склона влияет гидротермальная аргиллизация. Она сопровождается разуплотнением, формированием вторичной пористости и трещиноватости, а также резким снижением прочност-

ных и деформационных свойств, вплоть до превращения прочных массивов вулканических пород в специфические сильно аргиллизированные или глинистые толщи. Это является одной из главных причин перераспределения напряжений в склоновом массиве, что в конечном итоге приводит к потере его устойчивости и способствует активизации оползневых процессов

Для надежного моделирования и прогноза этих процессов необходимы данные о физико-механических свойствах исходных, гидротермально-измененных и новообразованных пород; информация о пространственной изменчивости свойств в разрезах гидротермальных систем; знания о динамике изменения свойств во времени в ходе гидротермального процесса, поскольку они могут происходить с высокой скоростью.

Кроме того, необходимо отметить тот факт, что оползни активно влияют на пространственное расположение, динамику и режим поверхностных термопроявлений, а в некоторых случаях крупные оползневые тела могут оказывать влияние и на структуру гидротермальной системы в целом.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Двигало В. Н., Мелекесцев И. В. Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвалных и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине гейзеров (по данным аэрофотограмметрии) // Вулканология и сейсмология, 2009, № 5, С. 24–37.
2. Лебедева Е. В., Балдина Е. А., Медведев А. А. Склоновые процессы в долине р. Гейзерной (Камчатка): результаты дешифрирования разновременных космических снимков высокого пространственного разрешения // ГЕОМОРФОЛОГИЯ, 2022, т. 53, № 4, С. 3–16.
3. Леонов В. Л. Обвал и оползень, произошедшие 4 января 2014 г. в Долине Гейзеров, Камчатка, и их последствия. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2014, № 1, Вып. 23, С. 7–20
4. Метасоматизм и метасоматические породы / Под ред. В. А. Жарикова, В. Л. Русинова. — М.: Научный мир, 1998, 492 с.
5. Пинегина Т. К., Делемень И.Ф., Дроздин В. А., Калачева Е. Г., Чирков С. А., Мелекесцев И. В., Двигало В. Н., Леонов В. Л., Селиверстов Н. И. Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вестник ДВО РАН, 2008, № 1, С. 33–45.
6. Фролова, Ю. В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения / Ю. В. Фролова. — М.: КДУ, 2015. — 222 с. — ISBN 978-5-906226-72-3.
7. Фролова Ю. В., Гвоздева И. П., Чернов М. С., Кузнецов Н. П. Инженерно-геологические аспекты гидротермальных преобразований туфогенных пород Долины Гейзеров (полуостров Камчатка) // Инженерная геология, 2015, № 6, С. 30–43.
8. Crow, N. B. An environmental overview of geothermal development: The Geysers- Calistoga KGRA (Known Geothermal Resource Area region) // Environmental geology, 1978, Vol. 4, NTIS Report # UCRL 52496, 72 p.
9. Darmawan H., Troll V. R., Walter T. R., Deegan F. M., Geiger H., Heap M. J., Seraphine N., Harris C., Humaida H., Muller D. Hidden mechanical weaknesses within lava domes provided by buried high-porosity hydrothermal alteration zones // Scientific Reports, 2022, 12:3202, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06765-9>.
10. Della Seta, M., Esposito C., Marmoni G. M., Martino S., Paciello A., Perinelli C., Sottili G. Geological constraints for a conceptual evolutionary model of the slope deformations affecting Mt. Nuovo at Ischia (Italy) // Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 2015, Vol. 2, P. 15–28.
11. Gvozdeva, I. P., Frolova J. V., Zerkal O. V. Slope processes hazards in geothermal areas: a case study of the Geysers Valley, Kamchatka // Proceedings of

- WGC 2015. — Australia, Melbourne 2015. — <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/12090.pdf>
12. Flynn T., Goff F., Van Eeckhout E., Goff S., Ballinger J., Suyama J. Catastrophic landslide at Zunil I Geothermal Field, Guatemala, January 5, 1991 // Geothermal Resources Council Transactions, 1991, Vol. 15, P. 425–433.
  13. Frolova J. V., Ladygin V.M., Rychagov S. N., Zukhubaya D. Z. Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril-Kamchatka island arc // Engineering Geology, 2014, Vol. 183, P. 80–95.
  14. Frolova J. V., Chernov M. S., Rychagov S.N, Zerkal O. V. The impact of hydrothermal alteration on the geological environment, Kamchatka Peninsula, Far East, Russia // Proceedings World Geothermal Congress 2020+1. Reykjavik, Iceland, April — October 2021.
  15. Kiryukhin, A. V., Rychkova, T. V., Dubrovskaya, I. K. Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant Landslide // Applied Geochemistry, 2012, Vol.27, P.1753–1766. — doi:10.1016/j.apgeochem.2012.02.011
  16. Kristianto, B., Gunderson R., Gunawan A. Geological engineering for hazard assessment of Pad AWI-14, Salak Field, West Java, Indonesia // Proceedings, 13 Indonesia Int. Geothermal Convention & Exhibition — Indonesia, 2013. — [https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/INAGA/2013/ES.05\\_BudiK\\_CVX.pdf](https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/INAGA/2013/ES.05_BudiK_CVX.pdf)
  17. Pioquinto, W.P.C., Caranto J. A., Bayrante L. F., Zarco M. H., Catane S. G. Mitigating a deep-seated landslide hazard — the case of 105 Mahiao Slide Area, Leyte Geothermal Production Field, Philippines // Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 2010, <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0218.pdf>
  18. Reid M. E., Sisson T. W., Brien D. L. Volcano collapse promoted by hydrothermal alteration and edifice shape, Mount Rainier, Washington // Geological Society of America. Geology, 2001, Vol. 29 (9), P. 779–782.
  19. Voight, B. Causes of landslides: Conventional factors and special considerations for geothermal sites and volcanic regions. Geothermal Resources Council Transactions. 1992. Vol.16, P. 529–533
  20. Wijaya, P. K., Zangel C., Straka W., Ottner F. (2017) Geological aspects of landslides in volcanic rocks in a geothermal area (Kamojang, Indonesia) // Proceedings, the 4th World Landslide Forum. — Ljubljana, Slovenia, 2017. — P.1–8. — DOI: 10.1007/978-3-319-53483-1\_51
  21. Zerkal O. V., Gvozdeva I. P. Landslide activity and landslide hazard in Geysers Valley (Kamchatka Peninsula, Russia). In book: Natural hazards and risk research in Russia, Innovation and discovery in Russian science and engineering. Springer Internat. Publ., 2019. Vol. 1, P. 317–344. DOI: 10.1007/978-3-319-91833-4\_23

DOI 10.53278/2306-9139-2023-2-21-44-51

УДК 631.4

## К ВОПРОСУ О КАЧЕСТВЕННОМ СОСТАВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

### ON THE SUBJECT OF THE NATURAL OBJECTS ORGANIC MATTER QUALITATIVE COMPOSITION

А. И. Попов<sup>1</sup>, К. И. Цивка<sup>2</sup>, Е. В. Сазанова<sup>3</sup>, Г. Д. Холостов<sup>4</sup>, О. Т. Жилкибаев<sup>5</sup>,  
Е.П. Шалунова<sup>6</sup>, А. А. Леонтьев<sup>7</sup>, В. П. Борисова<sup>8</sup>, Ю. В. Симонова<sup>9</sup>, О. В. Романов<sup>10</sup>,  
А.К. Ошмарина<sup>11</sup>, А. А. Кызин<sup>12</sup>

Alexander I. Popov<sup>1</sup>, Ksenia I. Tsyvka<sup>2</sup>, Ekaterina V. Sazanova<sup>3</sup>, Georgii D. Kholostov<sup>4</sup>,  
Oral T. Zhilkibaev<sup>5</sup>, Ekaterina P. Shalunova<sup>6</sup>, Alexander A. Leontev<sup>7</sup>, Valeria P. Borisova<sup>8</sup>,  
Yuliya V. Simonova<sup>9</sup>, Oleg V. Romanov<sup>10</sup>, Alexandra K. Oshmarina<sup>11</sup>, Andrey A. Kyzin<sup>12</sup>

<sup>1,3,4,6,7,8,9,10,11</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7/9,  
Санкт-Петербург, 199034, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Петербургское шоссе, 2,  
Санкт-Петербург-Пушкин, 196601, Россия

<sup>5</sup> Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, 050040,  
Республика Казахстан

<sup>12</sup> Башкирский государственный аграрный университет, ул. 50 лет Октября, 34, Уфа,  
Республика Башкортостан, 450001, Россия

<sup>1,3,4,6,7,8,9,10,11</sup> St. Petersburg State University, Universitetskaya Naberezhnaya St., 7/9, St. Petersburg,  
199034, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State Agrarian University, Peterburgskoe shosse, 2, St. Petersburg-Pushkin, 196601, Russia

<sup>5</sup> Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi av. 71, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan

<sup>12</sup> Bashkir State Agrarian University, 50 Let Oktyabrya St. 34, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450001, Russia

paihumic@gmail.com, ks.tsivka@gmail.com, katya97vs@yandex.ru, kholostov14@mail.ru,  
zhilkibaevoral@mail.ru, katerina13@mail.ru, dasher678@gmail.com, red\_fox71113@mail.ru, Uvsim@yandex.ru,  
ov\_romanov@mail.ru, st076421@student.spbu.ru, saimonnord@yandex.ru

**Аннотация:** Органическое вещество природных объектов (ОВПО) состоит из индивидуальных органических соединений и гуминовых веществ (ГВ), поэтому водный щелочной раствор извлекает из природных объектов как гуминовые, так и негуминовые вещества. Для того чтобы выделить ГВ в «чистом» виде (так называемые протогуминовые вещества), необходимо предварительно из ОВПО извлечь индивидуальные соединения, в частности фотосинтетические пигменты, меланины, гликопротеины, битумоиды А и С, грубодисперсный органический материал.

**Abstract:** Organic matter of natural objects (OMNO) consists of individual organic compounds and humic substances (HS), therefore aqueous alkaline solution extracts both humic and non-humic substances from natural objects. To isolate in “pure” form humic substances (so-called protohumic substances), it is necessary to extract individual compounds, specifically photosynthetic pigments, melanins, glycoproteins, bitumoids A and C, particular organic material, from the OMNO beforehand.

**Ключевые слова:** органическое вещество природных объектов; гуминовые вещества; черный щелок; фотосинтетические пигменты (хлорофиллы, каротиноиды); гликопротеиновые конъюгаты; меланины; битумоиды А и С; протогуминовые вещества.

**Keywords:** organic matter of natural objects; humic substances; black liquor; photosynthetic pigments (chlorophylls, carotenoids); glycoprotein conjugates; melanins; bituminoids A and C; protohumic substances.

**Введение**

Органическое вещество природных объектов (ОВПО) — весьма динамичная сложная и неоднородная система, состоящая из гуминовых веществ (ГВ) и индивидуальных соединений, а также из продуктов взаимодействия между собой и минеральной составляющей [26]. Содержание и качественный состав ОВПО, таких как: почвы, торфа, компосты, сапропели и другие природные объекты — являются важными характеристиками функционирования наземных и водных экосистем.

Общепринято [2, 13, 24], что содержание ГВ может составлять до 80–90 % от общего содержания ОВПО, но при этом из органического вещества почв водными щелочными растворами извлекаются всего лишь 40–60 % темноокрашенных соединений. Существует мнение [53], что водные щелочные растворы не обладают селективностью в отношении ГВ и способны переводить в жидкую фазу как гуминовые, так и негуминовые вещества. Кроме того, по-прежнему считается [23, 30, 38], что химически выделенные ГВ соответствуют таковым, присутствующим в природных объектах. Но так ли это?

Цель публикации — на основе анализа научной литературы, объяснить, что может входить в так называемые ГВ, извлекаемые из природных объектов водными щелочными растворами, охарактеризовать возможный компонентный состав ОВПО и обосновать новые подходы оценки компонентного состава органической составляющей природных объектов.

**Анализ проблемы**

Биосферное значение ОВПО связано с функционированием наземных экосистем. В связи с этим необходимо детальное изучение качественного состава органического вещества и нахождение новых способов его изучения.

Как следует из обзора научной литературы [1, 2, 4–9, 13, 15, 16, 18, 21, 24, 29, 30, 32, 34, 35, 40, 45, 50, 63, 74, 76], в состав ОВПО входят грубодисперсный органический материал (неразложившиеся и полуразложившиеся остатки растений и биоты), водорастворимые низкомолекулярные органические соединения (аминокислоты и пептиды, моно- и олигосахариды, фенольные соединения, карбоновые кислоты), фотосинтетические пигменты (хлорофиллы и каротиноиды), битумоиды (нейтральные и кислотные липиды), меланины (темноокрашенные пигменты биогенного происхождения) и гликопротеидные конъюгаты (пептиды, связанные с углеводами), а также гуминовоподобные соединения (протогуминовые вещества и, возможно, кероген — полимерный природный органический

материал, нерастворимый в органических растворителях). Наше представление о компонентном составе ОВПО представлено на рисунке 1.



Рис. 1. Компонентный состав органического вещества природных объектов.

Для извлечения темноокрашенного коллоидного раствора из ОВПО со второй половины 20-го века и по настоящее время чаще всего применяли водные растворы гидроксидов натрия или калия, значительно реже использовали углекислые растворы этих металлов и некоторые другие соли и еще реже — органические растворители [2, 11, 13, 14, 24, 25, 29, 30, 33, 52, 61, 65, 67, 70, 75]. Разделение ГВ на группы гуминовых кислот (ГК) и фульвокислот (ФК) основано на изменении агрегативной устойчивости этих коллоидных соединений в сильно кислой среде. Так, ГК в сильно кислой среде представляют собой агрегативно-неустойчивые коллоидные соединения при их содержании, превышающем критическую концентрацию мицеллообразования, а ФК — агрегативно-устойчивые коллоидные соединения в присутствии неорганических кислот [26], при этом негидролизующий остаток (или гумин) можно рассматривать как сложную смесь органических и органо-минеральных коллоидных агрегативно неустойчивых систем, состоящую из первоначально содержащихся в ОВПО, и из вторично образованных в ходе воздействия на природные объекты водных щелочных растворов (рис. 2).

Гуминовые вещества, извлеченные водными щелочными растворами из природных объектов — темноокрашенные нерегулярные гетерополимеры,



Рис. 2. Существующая схема разделения темноокрашенной смеси органических и неорганических соединений (гуминовых веществ), извлекаемой из природных объектами щелочными водными растворами.

ККМ — критическая концентрация мицеллообразования.

характеризующиеся отсутствием строгого постоянства химического состава и состоящие из компонентов разной молекулярной массы [26, 77]. По мнению К. Стилинка [68], ГВ — супрамолекулярные производные наземных растений. Установление молекулярной структуры ГВ, выделенных из ОВПО, ведётся в двух направлениях. Одно из них основано на применении физических методов, а другое — на изучении продуктов деструкции препаратов ГВ [12].

При использовании различных методов химического анализа органических соединений в составе ГВ, извлеченных из ОВПО, были идентифицированы и выделены различные индивидуальные органические соединения:

- 1) производные лигнина — бензолсодержащие соединения или арены [22, 37, 42, 44];
- 2) поли-, олиго- и моносахариды, а также аминосакхара [2, 20, 28, 37, 44, 47, 54, 55];
- 3) белки, пептиды и аминокислоты [3, 13, 21, 28, 34, 38, 39, 44, 51];
- 4) пуриновые и пиримидиновые основания [36];
- 5) липиды — длинноцепочечные алкильные составляющие [37, 44, 57].

Иными словами, ГВ, извлекаемые водными щелочными растворами, помимо протогуминовых веществ (ПГВ), содержат арилгликолипопротеиновый комплекс.

В продуктах химической деструкции препаратов ГВ, извлеченных из ОВПО, были определены ароматические и гетероциклические соединения (например, бензол, фуран, нафталин, антрацен,

пиррол, индол, пиридин, тиофен, хинолин и др.) [22]. Содержание углерода ароматических фрагментов в ГК может составлять от 35 до 92 % [48]. При этом в составе ГВ идентифицированы многочисленные фенольные соединения, которые не могут быть непосредственно преобразованы в хиноны [44]. Ароматичность ГВ, извлекаемых из почв различного происхождения, находится в интервале от 30 на 60 % (в большинстве случаев — 47–60 %), причем, ГК по сравнению с ФК несколько более ароматичны [57].

Углеводы, входящие в состав ГВ, могут быть связаны между собой ковалентными связями, аналогично белкам и аминокислотам [71], а также изменены и/или окислены до карбоновых, кетонных и/или уоновых кислот [37]. Помимо этого, углеводы способны химически взаимодействовать со структурными фрагментами лигнина [58]. Присутствие углеводов в ГВ может объясняться двумя причинами [49], одна из которых — включение некоторых углеводов, в частности полиуроновых кислот, в ГВ, а вторая — за счет соосаждения деградированных лигноуглеводных комплексов с гумусовыми кислотами (и ГК, и ФК) в сильноокислой среде.

На долю азота аминокислот может приходиться от 20 до 50 % от общего содержания азота ГВ, а на долю азота аминосакхаров — от 1 до 10 % [38, 39, 51, 66]. В ГВ, извлеченных из биокосных тел, определяются от 17 до 22 альфа-аминокислот, тех же, которые входят в состав белков растений, грибов и микроорганизмов [19, 56, 62], обычно массовая доля аминокислот составляет 6–10 % [19]. Источником аминокислот, содержащихся в ГВ, являются белки отмерших тел почвенной биоты и растений [45].

Основными компонентами меланинов, являющимися, по мнению Д.С. Орлова [20], предшественниками ГВ, химически выделенных из 4 грибных культур, были протеины и полисахариды [64]. При этом более «старые» меланины представляли собой сложный комплекс чёрного цвета, состоящий из хромогена, белка и полисахаридов, а более «молодые» меланины были коричневыми, в их состав входили хромоген и белок [10].

На долю липидов в составе ФК приходится 11–33 % и в составе ГК — 14–53 % [37]. Значительная часть алифатических соединений, входящих в состав ГВ — это парафины [57]. Липиды в основном представлены соединениями, содержащими от 1 до 20 атомов углерода, среди которых преобладают соединения с короткими цепочками. Алифатические соединения в ГВ входят в виде боковых цепочек, присоединённых к ароматическим соединениям, или в виде отдельных фрагментов в преде-



лах основной цепи полимеров [70]. Французскими учеными [44] из ГК были выделены линейные монокарбоновые кислоты и алканола, цепочки которых состояли из 12–32 атомов углерода, при этом происхождение коротких жирных линейных кислот и алканола с 15–17 атомами углерода было связано с жизнедеятельностью прокариотов, а происхождение длинных чётных алифатических компонентов — с отмершими остатками растений. Алифатические дикарбоновые кислоты могут выполнять роль мостиков между алкильными цепочками в матрице ГВ, в то время как жирные кислоты, спирты и ароматические кислоты в основном образуют моносубъединицы [46].

В процессе интерпретации аналитических результатов изучения химического состава ГВ возникает ряд проблем [43]: одни из них связаны с идентификацией компонентов ГВ, которые выделяются из природных объектов различными методами разными группами учёных; другие — с сильным изменением структурных фрагментов ГВ, возникающим при применении разнообразных деструкционных методов исследования химического состава; и третьи — с проявлением артефактов в случае использования «жестких» способов изучения компонентного состава гумусовых кислот.

Экспериментально установлено [60], что вследствие воздействия щелочных растворов на такие соединения, как лигнин, полисахариды и другие органические вещества, в водную жидкую фазу переходят олигомеры лигнина и сахаридов, образуя тёмноокрашенный коллоидный раствор, так называемый черный щёлок. Следует заметить, что в таком коллоидном растворе присутствуют продукты не только деструкции лигнина, но и его последующей реполимеризации [31, 41, 73]. Причем все производные лигнина могут терять свою агрегативную устойчивость в случае добавления минеральных кислот [60].

В результате щелочного гидролиза биологического материала, содержащего белки, нуклеиновые кислоты, углеводы, липиды и т. д., водный раствор приобретает кофейный цвет и содержит молекулы небольших пептидов, аминокислот, олиго- и моносахаров, а также мыла — натриевые или калиевые соли высших карбоновых кислот [72]. Находящиеся в черном щелоке органические вещества образуют трудно разделяемый многокомпонентный адсорбционный лигниноуглеводный комплекс со смолистыми веществами, полученный в результате гетерокоагуляции [17].

По мнению В. Фляйга [44], биохимический состав ГВ зависит не только от набора индивидуальных органических соединений, входящих в эти

вещества, но и от условий выделения, а также вследствие влияния неорганических почвенных коллоидов и/или соединений поливалентных металлов, попутно извлекаемых из минеральной составляющей природных тел (почв, сапропелей, углей и проч.) и т. д.

Для того чтобы корректно охарактеризовать сложный компонентный состав ОВПО, необходим такой метод, который, по мнению Ф.Дж. Стивенсона [69], не вызывал бы изменений извлекаемых органических соединений, позволял бы выделять компоненты ОВПО в «чистом» виде — без неорганических соединений (без производных глинистых минералов или соединений поливалентных катионов), извлекал бы органические вещества наиболее полно, был бы универсальным и применимым ко всем типам почв. На наш взгляд, одним из путей характеристики качественного состава ОВПО должен являться такой подход, который позволил бы выделять нативные ГВ, по возможности, без каких-либо индивидуальных органических соединений. Для этого необходимо сначала из природных тел с помощью органических растворителей выделить фотосинтетические пигменты, меланины, гликопротеиновые конъюгаты (гликопротеины) и липиды (битумоиды).

Предлагается следующий порядок оценки качественного состава ОВПО:

- 1) извлечение с помощью 90 % раствора диметилкетона фотосинтетических пигментов (каратиноиды, хлорофиллы *a*, *b* и  $c_1+c_2$ , феофетин);
  - 2) выделение меланинов и гликопротеиновых конъюгатов (гликопротеинов) 90 % раствором диметилкетона с добавлением  $H_3PO_4$ ;
  - 3) разделение меланинов и гликопротеиновых конъюгатов на основе потери гликопротеинами агрегативной устойчивости в водном растворе при  $pH = 7,0$ ;
  - 4) извлечение битумоидов А с помощью трихлорметана;
  - 5) отделение грубодисперсного органического материала;
  - 6) разрушение углекислых солей минеральной составляющей природных объектов 10 % водным раствором  $HCl$  с последующей отмывкой остатков хлорид-ионов;
  - 7) выделение битумоидов С, связанных ионами  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  и  $Fe^{2+}$  смесью этанола и бензола (в отношении 1:2);
  - 8) извлечение «чистых» гуминовых веществ (ПГВ) 0,5 М раствором КОН или другими щелочными растворами.
- Таким образом, неводные растворители позволяют выделить ряд индивидуальных органиче-

ских соединений (фотосинтетические пигменты, меланины, гликопротеины, битумоиды А и С), не вызывают гидролиза и не переводят в жидкую фазу неорганические соединения. Предварительное извлечение некоторых групп индивидуальных органических соединений дает возможность получить «чистые» ГВ (точнее, ПГВ).

### Выводы

1. Органическое вещество природных объектов (почв, торфов, компостов, сапропеля, бурого угля) состоит из: грубодисперсного органического материала, липофильных, амфифильных, гидрофобных алкалофильных, а также водорастворимых низкомолекулярных органических соединений.

2. Гуминовые вещества, извлекаемые из при-

родных объектов (почв, торфов, сапропелей, компостов и т. д.) водными щелочными растворами, содержат разнообразные индивидуальные органические соединения, как исходно входящие в состав органического вещества природных объектов, так и искусственно образовавшиеся в результате щелочного гидролиза и ресинтеза.

3. Предлагаемая характеристика компонентного состава органического вещества природных объектов должна проводиться на основе последовательного извлечения различных групп веществ: фотосинтетические пигменты → меланины и гликопротеиновые конъюгаты → битумоиды А → битумоиды С → протогуминовые вещества.

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ 19-29-05243.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алёкин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 444 с.
2. Александрова Л. Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 287 с.
3. Александрова Л. Н. Процессы гумусообразования в почве. // Гумусовые вещества почвы (их образование, состав, свойства и значение в почвообразовании и плодородии) / Записки Ленингр. с.-х. ин-та. Л.-Пушкин, 1970. Т. 142. С. 26–82.
4. Бирюкова О. Н., Орлов Д. С. О содержании хлорофилла в современных и погребенных почвах в ископаемых почвах и ископаемых осадках. // Известия АН СССР. Биол. науки. 1978. № 6. С. 119–122.
5. Браکش Н. А. Сапропелевые отложения и пути их использования. Рига: Зинатне, 1971. 282 с.
6. Ваксман С. А. Гумус: происхождение, химический состав и его значение в природе. М.–Л.: СЕЛЬХОЗГИЗ, 1937. 470 с.
7. Ваксман С. Исследования по разложению органических веществ и образованию гумуса почв. // Почвоведение. 1936. № 1. С. 145–146.
8. Драгунов С. С., Желоховцева Н. Н., Стрелкова Е. И. Сравнительное исследование почвенных и торфяных гуминовых кислот. // Почвоведение. 1948. № 7. С. 409–420.
9. Драйвер Дж. Геохимия природных вод / Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 440 с.
10. Елинов Н. П., Юрлова Н. А. Меланиновый пигмент *Aurebasidium (Pullularia) pullulans* Amaid (De Bary), 1910. // Биологические науки. 1976. № 7. С. 108–112.
11. Звягинцев Д. Г., Мирчинк Т. Г. О природе гуминовых кислот почв. // Почвоведение. 1986. № 5. С. 68–75.
12. Комиссаров И. Д., Стрельцова И. Н. Исследование молекулярной структуры гуминовых препаратов методом окислительной деструкции. // Гуминовые препараты / Научн. труды Тюменского с.-х. ин-та. Тюмень, 1971. Т. 14. С. 70–74.
13. Кононова М. М. Органическое вещество почвы, его природа, свойства и методы изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 314 с.
14. Кононова М. М., Бельчикова Н. П. Ускоренные методы определения состава гумуса минеральных почв // Почвоведение. 1961. № 10. С. 75–88.
15. Кухаренко Т. А. Химия и генезис ископаемых углей. М.: Госгортехиздат, 1960. 328 с.
16. Лопотко М. З. Озера и сапропель. / Под ред. чл.-кор. АН БССР И. И. Лиштвана. Минск: Наука и техника, 1978. 88 с.
17. Лысогорская Н. П., Демьянцева Е. Ю., Клубин В. В. О гетерогенности водно-щелочных растворов сульфата лигнина и древесной смолы. // Коллоидный журнал. 2002. Т. 64. № 3. С. 427–429.
18. Лях С. П., Рубан Е. Л. Микробные меланины. М.: Наука, 1972. 185 с.
19. Орлов Д. С. Гуминовые вещества в биосфере. // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 2. С. 56–63.
20. Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 325 с.
21. Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. 333 с.
22. Орлов Д. С. Теоретические и прикладные проблемы химии гумусовых веществ. // Итоги науки

- и техники / Почвоведение и агрохимия. М., 1979. Вып. 10. С. 58–132.
23. Орлов Д. С., Бирюкова О. Н., Розанова М. С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов. // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.
  24. Орлов Д. С., Бирюкова О. Н., Суханова Н. И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 254 с.
  25. Пономарёва В. В., Плотникова Т. А. Гумус и почвообразование (методы и результаты изучения). Л.: Наука, 1980. 222 с.
  26. Попов А. И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование / Под ред. Е. И. Ермакова. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2004. 248 с.
  27. Попов А. И., Чертов О. Г. Биогеоэкологическая роль органического вещества почв. // Вестник С.-Петербур. ун-та. 1996. Серия 3. Биол. Вып. 2. С. 88–97.
  28. Пунтус Ф. А. Исследование углеводного и аминокислотного состава гидролизатов гуминовых кислот сапропелей. // Проблемы использования сапропелей в народном хозяйстве. Минск: Наука и техника, 1976. С. 122–128.
  29. Семёнов В. М., Когут Б. М. И. В. Тюрин и актуальные направления развития учения об органическом веществе почв в 21 веке // Наследие И. В. Тюрина в современных исследованиях в почвоведении / Материалы Междунар. науч. конф. Казань, 15–17 октября 2013 г. Казань: Отечество, 2013. С. 9–15.
  30. Семёнов В. М., Когут Б. М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
  31. Тарабанько В. Е., Ильина И. И., Петухов Д. В., Первышина Е. П. О механизме окислительного расщепления углерод-углеродной связи лигнинов в щелочной среде. // Химия растительного сырья. 1997. № 3. С. 51–58.
  32. Трусов А. Г. Материалы к изучению почвенного гумуса. / Часть 1-я. Процессы образования «гуминовой кислоты». Экспериментальное исследование. Петроград: Типография М. М. Стасюлевича, 1917. 210 с.
  33. Тюрин И. В. К методике анализа для сравнительного изучения состава почвенного гумуса // Труды Почвен. ин-та им. В. В. Докучаева. М., 1951. Т. 38. С. 5–21.
  34. Тюрин И. В. Органическое вещество почв и его роль в плодородии. М.: Наука, 1965. 320 с.
  35. Элингтон Д., Мэрфи Д. Органическая геохимия. Л.: Недра, 1974. 487 с.
  36. Anderson G. Estimation of purines and pyrimidines in soil humic acid. // Soil Sci. 1961. V. 91. No. 3. P. 156–161.
  37. Beyer L. The chemical composition of soil organic matter in classical humic compound fractions and in bulk samples — a review. // Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 1996. Bd. 159. P. 527–539.
  38. Bremner J. M. Nitrogen compounds. // Soil Biochemistry / Eds.: A. D. McLaren and G. H. Peterson. New York: Dekker, 1967. P. 19–90.
  39. Bremner J. M. Studies on soil humic acids. 1. The chemical nature of humic nitrogen. // J. Agr. Sci. 1955. V. 46. Part 2. P. 247–256.
  40. Cambardella C. A., Elliott E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. // Soil Science Society of America Journal. 1991. V. 56. Is. 3. P. 777–783.
  41. Cordoso M. de Oliveria D. D., Passos M. L. Chemical composition and physical properties of black liquors and their effects on liquor recovery operation in Brazilian pulp mills. // Fuel. 2009. V. 88. Is. 4. P. 756–763.
  42. Cvikrova M., Hrubcová M. Identification of phenolic acids in chernozem, gley and podsol soils. // Stud. About Humus. Humus et Planta / VII. Trans. Int. Symp. Brno, 1979. S. 1. 1979. P. 142–146.
  43. Felbeck G. T. Structural Hypotheses of Soil Humic Acids. // Soil Sci. 1971. V. 111. No. 1. P. 42–48.
  44. Flaig W. Generation of Model Chemical Precursors. // Humic Substances and Their Role in the Environment / S. Bernhard. Dahlem Konferenzen / Eds.: F. H. Frimmel and R. F. Christman. John Wiley & Sons Limited, 1988. P. 75–92.
  45. Flaig W. Organic compounds in soil. // Soil. Sci. 1971. V. 111. Is. 1. P. 19–33.
  46. Grasset L., Amblès A. Structure of humin and humic acid from an acid soil as revealed by phase transfer catalyzed hydrolysis. // Organic Geochemistry. 1998. V. 29. Is. 4. P. 881–891.
  47. Greenland D. J., Oades J. M. Saccharides. // Soil components / Ed.: J. E. Gieseking. New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 1975. P. 213–262.
  48. Hatcher P. G., Schnitzer M., Dennis L. W., Maciel G. E. Aromaticity of humic substances in soils. // Soil Sci. Soc. Am. J. 1981. V. 45. P. 1089–1094.
  49. Hayes M. H.B., Dawson J. E., Mortensen J. L., Clapp C. E. Electrophoretic characteristics of extracts from sapric histosol soils. // Materials of 2nd Int. Conf. IHSS / Eds.: M. H. B. Hayes and R. S. Swift. Birmingham, U.K., 1984. P. 31–41.
  50. Hoyt P. Fate of chlorophyll in soil. // Soil Science. 1971. V. 111. Is. 1. P. 49–53.
  51. Khan S. U., Sowden F. J. Distribution of nitrogen in fulvic acid fraction extracted from the black solonchic and black chernozemic soils of Alberta. // Can. J. Soil Sci. 1972. V. 52. No. 1. P. 116–118.

52. Kibblewhite M. G., Tinsley J. Soil organic matter studies: extraction with formic acid/dimethyl sulphoxide mixtures and fractionation with Zr (IV) // *J. Soil Sci.* 1979. V. 30. No. 2. P. 303–314.
53. Kleber M., Lehmann J. Humic Substances Extracted by Alkali Are Invalid Proxies for the Dynamics and Functions of Organic Matter in Terrestrial and Aquatic Ecosystems. // *Journal of Environmental Quality* 2019. V. 48. Is. 2. P. 207–216.
54. Linhares L. F., Martin J. P. Carbohydrate content of fungal humic acid-type polymers (melanins). // *Soil. Sci. Soc. Amer. J.* 1979. V. 43. No. 2. P. 313–318.
55. Lowe L. E. Carbohydrates in soil. // *Soil Organic Matter / Eds.: M. Schnitzer and S. U. Kahn.* Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier, 1978. P. 65–93.
56. Martin F., Saiz-Jimenez C., Cert A. Pyrolysis-gas-chromatography-mass spectrometry of soil humic fractions: II. The high boiling point compounds. // *Soil Sci. Soc. Amer.* 1979. V. 43. No. 2. P. 309–312.
57. Nardi S., Pizzeghello D., Muscolo A., Vianello A. Physiological effects of humic substances on higher plants — review. // *Soil Biol. Biochem.* 2002. V. 34. Is. 11. P. 1527–1536.
58. Ogner G. The complexity of forest soil carbohydrates as demonstrated by 27 different O-methyl monosaccharides, 10 previously unknown in nature. // *Soil Sci.* 1980. V. 129. No. 1. P. 1–4.
59. Olk D. C., Bloom P. R., Perdue E. M., McKnight D. M., Chen Y., Farenhorst A., Senesi N., Chin Y.-P., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Harir M. Environmental and Agricultural Relevance of Humic Fractions Extracted by Alkali from Soils and Natural Waters. // *J. Environ. Quality.* 2019. V. 48. Is. 2. P. 217–232.
60. Oriez V., Peydecastaing J., Pontalier P.-Y. Lignocellulosic Biomass Mild Alkaline Fractionation and Resulting Extract Purification Processes: Conditions, Yields, and Purities. // *Clean Technologies and Environmental Policy.* Springer Verlag. 2020. V. 2. Is. 1. P. 91–115.
61. Orioli G. A., Curvetto N. R. Evaluation of extratants for soil HS. I. Isotachophoretic studies // *Plant and Soil.* 1980. V. 55. No. 3. P. 353–361.
62. Paramonova T. A., Zech W. Investigation of Humic Acids Structure from a Podzol Profile: Wet Chemical and  $^{13}\text{C}$  NMR Spectroscopic Data. // *The Role of Humic Substances in the Ecosystems and in Environmental Protection / Eds.: J. Drozd, S. S. Gonet, N. Senesi and J. Weber / Proc. of the 8th Meeting of the IHSS (Wroclaw, Poland, September 9–14, 1996).* Wroclaw, Poland: PTSH Polish Society of Humic Substances, Polish Chapter of the IHSS, 1997. P. 467–474.
63. Rillig M. C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin and soil quality. // *Canadian Journal of Soil Science.* 2004. V. 84. P. 355–363.
64. Saiz-Jimenez C., Martin F., Cert A. Low boiling-point compounds produced by paralysis of fungal melanins and model phenolic polymers. // *Soil Biol. and Biochem.* 1979. V. 11. No. 3. P. 305–309.
65. Scheffer F., Zichmann W., Pawelke G. Über die schonende Gewinnung natürlicher Huminstoffe mit Hilfe milder organischer Lösungsmittel. // *Z. Pflanzenernähr.* 1960. Bd. 90. H. 1/2. P. 58–69.
66. Schnitzer M. Humus Substances: Chemistry and Reactions. // *Soil Organic Matter / Eds.: M. Schnitzer and S. U. Khan / Development of Soil Sci.* No. 8. Ottawa, 1978. P. 1–64.
67. Senesi N., Testini C., Polemio M. The chemical and spectroscopic characterization of soil organic matter fractions isolated by sequential extraction procedure // *J. Soil Sci.* 1983. V. 34. No. 4. P. 801–813.
68. Steelink C. What is Humic Acid? A Perspective of the Past Forty Years. // *Understanding HS. Advanced Methods, Properties and Applications. / Eds.: E. A. Ghabbour and G. Davies.* Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1999. P. 1–8.
69. Stevenson F. J. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. / 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 512 p.
70. Swift R. S. Organic Matter Characterization // Part 3. *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods / Eds.: D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston and M. E. Sumner / Book Series no. 5.* Madison, WI: Soil Science Society of America and American Society Agronomy, 1996. P. 1011–1020.
71. Taneda H., Hosoya S., Nakona J., Chang H.-M. Behaviour of lignin-hemicellulose linkages in chemical pulping. // *Poster Presentations / Int. Symp. on Wood and Pulping Chem. (Vancouver, B.C., August 26–30, 1985).* 1985. P. 117–118.
72. Thacker H. L. Chapter 6: Alkaline hydrolysis. // *Carcass disposal: a comprehensive review.* Kansas: National Agricultural Biosecurity Center Consortium USDA APHIS Cooperative Agreement Project Carcass Disposal Working Group, National Agricultural Biosecurity Center, Kansas State University, 2004. 12 p.
73. Thring R. W., Chornet E., Bouchard J., Vidal P. F., Overend R. P. Characterization of lignin residues derived from the alkaline hydrolysis of glycol lignin. // *Canadian Journal of Chemistry.* 1990. V. 68. No. 1. P. 82–89.
74. Thurman E. M. Organic geochemistry of natural water / *Developments in Biogeochemistry* Wageningen. V. 2. Springer Netherlands, 2013. 497 c.

75. Whitehead D. C., Tinsley J. Extraction of soil organic matter with dimetilformamide. // Soil. Sci. 1964. V. 97. No. 1. P. 34–42.
76. Wright S. F., Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi // Plant and soil. 1998. V. 198. No. 1. P. 97–107.
77. Ziechmann W. Evolution of Structural Models from Consideration of Physical and Chemical Properties. // Humic Substances and Their Role in the Environment. / S. Bernhard, Dahlem Konferenzen / Eds.: F. H. Frimmel and R. F. Christman. John Wiley & Sons Limited, 1988. P. 113–132.

DOI 10.53278/2306-9139-2023-2-21-52-52

**ДИСКУССИЯ**  
**ПО СТАТЬЕ А. И. ПОПОВА, К. И. ЦИВКИ, Е. В. САЗАНОВОЙ И ДР.**  
**«К ВОПРОСУ О КАЧЕСТВЕННОМ СОСТАВЕ**  
**ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ»**

Общеизвестно, что гумусовые вещества почв играют в биосфере исключительную роль. Они являются аккумулятором энергии и источником углекислого газа в биосфере, участвуют в формировании среды обитания и жизнедеятельности растений, почвенных животных и микроорганизмов, служат для них источником элементов питания и определяют практически все важнейшие свойства почв, являясь мощным агентом их формирования и почвенного плодородия. Именно поэтому на протяжении всего развития почвенной науки проблеме гумуса уделяется пристальное внимание. Постоянно разрабатывается и совершенствуется методическая база исследований. В этой связи статья А.И. Попова и его соавторов, посвященная поиску и обоснованию новых подходов к изучению органического вещества почв, представляет несомненный интерес, однако вызывает и ряд возражений, с которыми хотелось бы ознакомить читателей журнала.

Прежде всего, не все цитируемые в статье работы имеют отношение к исследованию, и напротив, отсутствуют ссылки на классические методические работы по приемам фракционирования гумуса (Плотникова, 1967, 1971, 1972; Пономарева, Плотникова, 1967, 1968, 1975, 1980; Орлов, 1974; Орлов, Глебова, Мироненко, 1976; Орлов, Гришина, 1968) и современные обширные обзоры как отечественных, так и зарубежных исследователей по проблеме методов исследования гумуса.

По нашему мнению, предлагаемая схема методически не проработана на разных объектах (или данные об этом не представлены), а экспериментальная основа для предложенных схем фракционирования органического вещества отсутствует. Основное упущение заключается в том, что использование органических растворителей для последовательного извлечения органических соединений из образца почвы не позволяет получить их точную количественную оценку, следовательно, и параметрическую оценку фракций. Если же у авторов есть оригинальная методика количественной оценки фракций, получаемых по предлагаемой схеме, то ее следовало хотя бы вкратце охарактеризовать в работе.

В части анализа результатов следует отметить отсутствие их сравнения с данными, полученными

при фракционировании органического вещества почв и других природных объектов общепринятыми методами. Что касается реальности гумусовых кислот и вопроса об их индивидуальности, которые авторы поднимают в статье, то убедительные ответы на эти вопросы были получены еще в 70-х годах прошлого века и очень четко сформулированы Д.С. Орловым. Реальность существования гумусовых кислот к настоящему времени подтверждена и обоснована многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых. Гумусовые кислоты встречаются не только в почвах, но и в природных водах. Причем из последних их извлекают без применения щелочных или кислотных реагентов. В то же время применение самых различных реагентов позволяет получать очень близкие по свойствам и структуре продукты.

А так называемый «черный щелок», который авторы рассматривают в работе, получают, используя для извлечения гумусовых веществ высокие концентрации щелочи, а иногда и высокотемпературную «варку». В общепринятых же схемах извлечения гуминовых веществ применяют слабые растворы щелочи (0,1 М) — «мягкие» методы экстракции, позволяющие свести к минимуму структурные изменения гумусовых кислот.

Заметим, что попытки использования различных, в том числе и органических реагентов, для извлечения гуминовых веществ из почв и других природных объектов предпринимались и ранее. Поэтому авторам следовало бы показать, в чем новизна и преимущество предлагаемого метода фракционирования, самое главное, четко высказать свою точку зрения на объект исследования (гуминовые, протогуминовые вещества) и определить функциональную роль выделяемых фракций органического вещества в формировании почв, их плодородия и экологической устойчивости, чтобы дать возможность применения предлагаемого подхода к решению вопросов почвоведения, агрохимии и экологии.

Доцент кафедры агрохимии,  
к.б.н. Н. Е. Орлова  
29.11.2023

DOI 10.53278/2306-9139-2023-2-21-53-61  
УДК 624.131

## 100 ЛЕТ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ШКОЛЫ ГРУНТОВЕДЕНИЯ

### 100 YEARS OF THE LENINGRAD SCHOOL OF soil science

© 2023 г. Е. П. Каюкова

© 2023 E. P. Kayukova

*Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7–9,  
Санкт-Петербург, 199034, Россия*

*St.Petersburg State University, Universitetskaya Emb., 7/9, St.Petersburg, 199134, Russia*

epkayu@gmail.com

**Аннотация:** Первые элементы грунтоведения как науки начинают появляться в России в 20-х годах прошлого столетия и окончательно оформляются в новое научное направление на рубеже 30-х годов. Создание Исследовательского дорожного бюро (1924 г.) и первой в стране научно-исследовательской дорожной лаборатории (1925 г.) открыло новую область в дорожном деле. В развитии грунтоведения как науки Санкт-Петербургский (Ленинградский) государственный университет сыграл ключевую роль. Основатели научной школы грунтоведения ЛГУ — П.А. Земятченский, В. В. Охотин, Н. И. Прохоров.

**Abstract:** The first elements of the science «Soil science» begin to appear in Russia in the 20s of the last century and finally take shape in a new scientific direction at the turn of the 30s. The creation of the Road Research Bureau (1924) and the country's first road research laboratory (1925) opened a new direction in road business. St. Petersburg (Leningrad) State University has played a key part in the development of soil science as a science. The founders of the scientific school of soil science at Leningrad State University are N. I. Prokhorov, P. A. Zemyatchensky, V. V. Okhotin.

**Ключевые слова:** дорожное бюро (1924), грунтоведение, кафедра грунтоведения ЛГУ

**Key words:** road bureau (1924), soil science, department of soil science LSU

Во второй половине 1923 г. в России начались первые научные дорожно-почвенные исследования по изучению механических и физико-химических свойств грунтов, ставшие предтечей новой науки — грунтоведение. Это было связано с размахом строительства в стране, когда Советский Союз взял курс на индустриализацию с целью сокращения отставания советской экономики от экономики развитых капиталистических стран [5, 14].

В начале 1920-х годов в СССР (после революции и гражданской войны) царило жуткое бездорожье, дорожное строительство находилось в зачаточном состоянии. Изучению физических и механических свойств почв и грунтов с целью характеристики их строительных качеств (как оснований сооружений и как строительного материала) уделялось недостаточное внимание. Расчетные данные опирались на абстрактные математические построения. Во второй половине 1920-х годов постепенно меняются взгляды специалистов — грунты начинают рассматривать как образования, обладающие

специфическими свойствами в зависимости от их историко-геологических условий образования. За рубежом вопросами дорожного строительства озадачились гораздо раньше, в процессе улучшения гужевых грунтовых дорог за счет местных дешевых материалов.

Переосмысливая прошлое, В.В. Охотин (1947) писал, что при возведении мощных гидротехнических, промышленных, коммунальных сооружений нельзя допускать больших неравномерных осадок, поэтому основанием для них должны служить только определенные горные породы. Все это и побудило изучать горные породы как основания сооружений и как строительные материалы. Поскольку верхние слои литосферы сложены главным образом из рыхлых пород, то вполне естественно, что основное внимание было обращено именно на их исследование. При этом в первую очередь изучались свойства, которые характеризовали поведение горной породы в основании сооружений и в качестве строительного материала. По этой

причине и в понятие «грунт», преимущественно, вкладывалось инженерное содержание [17].

В разрушенной стране для восстановления народного хозяйства, разворачивания социалистического строительства требовались хорошие дороги. В 20-х годах прошлого века государственные и стратегические дороги находились в ведении Центрального управления местного транспорта (ЦУМТ) Народного Комиссариата путей сообщения (НКПС), которому были подчинены окружные управления местного транспорта (ОМЕСы).

Соединенные Штаты Америки на тот исторический период были классической страной грунтового строительства. Так инженер Б. П. Жерве, анализируя зарубежный опыт, писал, что Европа совершенствует каменную сеть дорог, оставляя на ней смешанное (автоконное) движение. Америка же строит дороги заново при огромном автомобильном движении. В этом отношении для нас интересен американский автогрунтовый транспорт, когда автомобиль овладевает грунтовой сетью [3].

Именно опыт американских инженеров стал примером для советских специалистов. Он показал, что для успешного строительства дорог необходимо знать физико-механические свойства грунтов и материалов, а также их влияние на строительные характеристики. Таким образом, к дорожно-строительному делу стали привлекать почвоведов.

В 1923 г. по инициативе инженеров Б. П. Жерве и К. И. Лубны-Герцык в Ленинградском ОМЕС начались первые в России дорожно-почвенные научно-исследовательские работы. Они включали изучение механических свойств грунтов различного состава в различном состоянии влажности. Первые исследования почв в связи с запросами дорожного строительства начали проводиться на договорной

основе в почвенной лаборатории Петроградского (Ленинградского) сельскохозяйственного института (рис. 1) силами крупного ученого-почвоведа заведующего кафедрой почвоведения проф. Н.И. Прохорова, молодого начинающего ученого — ассистента кафедры В.В. Охотина и агронома И.М. Шерстобитова при участии В. К. Яновского и инженера ОМЕС К. И. Лубны-Герцык.

Программа лабораторных исследовательских работ была утверждена техническими совещаниями ОМЕС и ЦУМТ. Петроградский ОМЕС выделил средства на сбор образцов и исследования почв и грунтов с дорожной точки зрения, включающие определение гранулометрического состава, пластичности, липкости, усадки и других свойств. В то время качество дорожного полотна и оснований, исходя из естественно-исторического образования почв и грунтов, понималось как одно из основных условий дорожного строительства.

Все исследования курировались Н.И. Прохоровым. Николай Иванович также являлся штатным профессором Географического института (с 1925 г. — Ленинградского университета), где преподавал почвоведение.

В марте 1924 г. по распоряжению ЦУМТ, ведающего исследованием грунтовых дорог области, в Ленинградском отделении ОМЕС была образована специальная межведомственная Комиссия по грунтово-дорожным исследованиям, призванная объединять и координировать научную деятельность всех дорожных органов, курировать исследования грунтов для дорожного строительства, использовать почвоведение в дорожном деле. В Комиссию вошли инженеры — Б.П. Жерве, Н.Н. Иванов, К.И. Лубны-Герцыг, Н.В. Немилов, а также приглашенные специалисты — минералог проф. П.А. Землячченский, почвовед проф. Н.И. Прохоров, гидравлик И.О. Москвитин. Именно они стояли у истоков нового научного направления в России.

Комиссия имела 20 заседаний и, проработав до мая, выявила основные положения, на коих могли быть установлены первоначальный план и программа исследовательских работ [16]. О результатах работ в мае 1924 г. было доложено в отделении каменностроительных материалов Комиссии производительных сил при Академии Наук СССР.

В итоге были организованы две почвенные партии для работ в Ленинградской и Псковской губерниях. Полевые работы 1924 г. сосредоточились на дороге Волховстрой (Уткина Заводь — Новосаратовская колония), где была поставлена срочная задача выработки смеси грунтов и потребовалась подробная полевая и лабораторная их оценка. Общее руководство научно-исследовательскими



Рис. 1. Лабораторные работы по исследованию грунтов в сельскохозяйственном институте  
Слева направо: В. А. Балыц, проф. Н. И. Прохоров, Б. И. Кубеш, Б. П. Жерве, В. В. Охотин [16]



работами было возложено на инициатора проекта — Бориса Петровича Жерве. Как вспоминал П. А. Земятченский [5], старые кадровые инженеры-путейцы первоначально холодно, и даже враждебно приняли эту Комиссию. Однако благодаря своей успешной работе Комиссия в конце 1924 г. была превращена в Исследовательское дорожное бюро, а еще через несколько лет — в самостоятельный научно-исследовательский автодорожный институт (НАДИ). При этом существовало понимание, что все исследования должны иметь научную основу и опираться на фундаментальные исследования.

В процессе первых лабораторных работ стало очевидным — необходимо создать собственную лабораторию Дорожного бюро. К организации лаборатории приступили в октябре 1924 г. К 1 января 1925 г. основные организационные работы по оборудованию лаборатории закончились, и Исследовательское дорожное бюро с собственной научно-исследовательской лабораторией при Ленинградском ОМЕС начали свою деятельность.

### Исследовательское дорожное бюро ЦУМТ

Первоначально Исследовательское дорожное бюро располагалось в здании Управления северо-западного районного комитета по урегулированию перевозок (СЗРК) на наб. Фонтанки, д. 117. В его функции входили также и вопросы развития, усиления и улучшения существующих путей сообщения района. В октябре 1925 г. исследовательские работы переходят из Ленинградского ОМЕС в центр, и, таким образом, с этого времени Исследовательское дорожное бюро непосредственно подчиняется ЦУМТ (Приказ ЦУМТ № 96 от 27.10.1925). На Исследовательское бюро (согласно Положения, утвержденного приказом НКПС СССР № 8723-АНЦ-12 от 13.06.1926) было возложено руководство дорожно-исследовательским делом в СССР. Так в 20-е годы зарождалось дорожное почвоведение (грунтоведение) в тяжелых условиях становления народного хозяйства страны.

В 1928 г. Исследовательское дорожное бюро ЦУМТ было переведено на ул. Большая Морская, д. 19, где оно существовало вплоть до 1930 г. Основные задачи Бюро состояли в объединении деятельности дорожных органов ЦУМТ по исследованию почвенно-грунтовых и гидрометеорологических явлений на шоссейных и грунтовых дорогах. Начальником Бюро был назначен инженер Б. П. Жерве, заведующим грунтовой лабораторией — профессор П. А. Земятченский (старшим лаборантом — В. В. Охотин, лаборантами — С. О. Рутковский

и В. К. Яновский), заведующим отделом дорожной геофизики — М. И. Сумгин, заведующим группы механики — В. А. Кондрашков, заведующим техническим отделом — инженер Н.Н. Иванов, заведующим полевыми исследованиями — профессор Н. И. Прохоров.

За короткий период своего существования Исследовательское дорожное бюро открыло ряд дорожно-исследовательских станций: на Северном Кавказе, в Харькове, на Дальнем Востоке, в Москве и др.

### Основные сотрудники Исследовательского дорожного бюро

Все основные сотрудники Бюро были людьми неслучайными. У каждого за плечами богатый персональный опыт научных исследований, полевых и лабораторных работ, неиссякаемая творческая энергия. В итоге работа Бюро уже тогда была высоко оценена специалистами, получила признание первоначально скептически настроенных инженеров-дорожников к привлечению почвоведов к дорожному строительству.

На рис. 2 собраны фотографии основных сотрудников Исследовательского дорожного бюро. К сожалению, страшные времена сталинских репрессий не обошли стороной специалистов-грунтоведов. Были расстреляны Б. П. Жерве и Н. И. Прохоров, их фотографии чудом сохранились, а имена незаслуженно преданы забвению. Однако вклад их в становлении грунтоведения огромен.

Б. П. Жерве (1875–1930) — инженер, член ученого совета научно-мелиорационного института



Рис. 2. Основные сотрудники Исследовательского дорожного бюро ЦУМТ

народного комиссариата земледелия РСФСР, редактор специального журнала. До революции состоял инженером путей сообщения в чине коллежского советника. Обвинен в контрреволюционной деятельности, расстрелян как вредитель в дорожном хозяйстве. Посмертно реабилитирован.

Н. И. Прохоров (1877–1930) — преподаватель (доцент) физико-математического факультета Ленинградского университета (ученик Н. М. Сибирцева и К. Д. Глинки), профессор один из организаторов географического института (позже преобразованного в факультет Ленинградского университета), заведующий кафедрой почвоведения Ленинградского сельскохозяйственного института (ЛСХИ), ученый секретарь и ст. почвовед в Почвенном институте им. В. В. Докучаева, пионер изучения многолетнемерзлых пород. Расстрелян за потерю топографических карт. Посмертно реабилитирован.

П. А. Земятченский (1856–1942) — профессор физико-математического факультета Ленинградского университета (ученик В. В. Докучаева), старший почвовед, зав. отделом выветривания в почвенном институте им. В. В. Докучаева), директор (позже зав. отделом) государственного керамического исследовательского института, член-корреспондент АН СССР. Заведовал кафедрой грунтоведения ЛГУ (с 1930 по 1934 г., с 1939 по 1942 г.).

В. В. Охотин (1888–1954) — ученик Н. И. Прохорова и П. А. Земятченского, ассистент почвоведения сельскохозяйственного института, сотрудник дорожной лаборатории политехнического института им. М. И. Калинина. В дальнейшем ассистент, доцент, профессор, заведующий кафедрой грунтоведения ЛГУ (с 1934 по 1937 г., с 1942 по 1954 г.).

М. И. Сумгин (1873–1942) — основоположник российского мерзлотоведения, один из организаторов комиссии по изучению вечной мерзлоты (КИВМ), заместитель академика В.А. Обручева в КИВМ. В 30-х годах работал в качестве доцента в Ленинградском университете (специальность «грунтоведение»). Звание доктора геологических наук получил без защиты диссертации (по совокупности заслуг).

Н. Н. Иванов (1888–1977) — профессор кафедры дорожного дела Ленинградского института инженеров путей сообщения, зам. директора по научной работе НАДИ (ЛАДИ). С 1942 по 1954 г. — директор Всесоюзного Дорожного научно исследовательского института (ДорНИИ). Заведующий кафедрой «Строительство и эксплуатация дорог» МАДИ (1948–1975). Доктор технических наук без защиты диссертации по совокупности заслуг (1939).

## Работы Бюро

Спектр работ Бюро был достаточно широк, основные из них включали научные исследования по изучению физических свойств почв, их механического и химического состава. Сотрудники Бюро изучали законы образования и распространения почв Советского Союза и сопредельных стран, составляли почвенные карты. Так в дорожном деле возникло новое направление.

С первых дней существования Бюро большое внимание уделялось разработке различных методов укрепления грунтов, поскольку при строительстве автомобильных дорог в районах, не обеспеченных каменным материалом, приходилось использовать местные грунты для устройства дорожных одежд. Некоторые виды промышленности, использующие грунты как минеральное сырье, требовали изучения их состава и свойств.

Благодаря специальным публикациям, участиям в научных совещаниях и конференциях, а также тому, что практически все сотрудники Бюро преподавали в высших учебных заведениях, результаты исследований достаточно быстро становились достоянием научной общественности и были доступны широкому кругу специалистов по грунтово-дорожному строительству.

Дорожное бюро выпустило два солидных сборника трудов по исследованию почв и грунтов в дорожных целях. Эти труды наметили новые траектории в исследованиях грунтов в различных областях строительства, заложив основы дорожного почвоведения. Таким образом, первой в стране сложилась именно Ленинградская научная школа грунтоведения, на это указывают публикации тех лет [4, 6, 7, 9, 10, 18–23]. С этими фундаментальными работами можно познакомиться в библиотеке ВСЕГЕИ.

Сотрудники Бюро внимательно следили за достижениями в дорожном строительстве за рубежом. Так, в сентябре 1926 г. в Милане прошел V Всемирный дорожный конгресс, который собрал около 2000 участников из 55 стран [24]. Основными вопросами были специальные дороги, предназначенные для автомобильного движения (бетонные дороги, битумные и асфальтированные), а также стандартизация испытаний для дорожных материалов, таких как каменноугольная смола, битумы и асфальты. В делегацию от Советского Союза входил Б.П. Жерве как начальник Исследовательского бюро. Дорожный конгресс сопровождался III международной дорожной выставкой, в которой участвовали сотрудники Бюро, где демонстрировали свои достижения в дорожном деле (рис. 3). Для этого были проведены крупнейшие графические



Рис. 3. Главный павильон Выставки V Международного дорожного конгресса в Милане, 1926 г. [26]  
Стенд Исследовательского бюро ЦУМТ в главном павильоне Выставки (справа) [16]

и фотографические работы, которые в дальнейшем составили ядро дорожного музея.

Для V Международного дорожного конгресса и Выставки были подготовлены три брошюры на трех языках, в которых излагались о достижениях сотрудников Бюро, объяснялись экспонаты Выставки. Так, брошюра с пояснениями к графическим материалам выставки была подготовлена Н.Н. Ивановым [11]. Брошюра М. И. Сумгина была посвящена дорожным сетям в условиях вечной мерзлоты. На стенде Исследовательского бюро были представлены карты «Распространение вечной мерзлоты в пределах СССР» и «Схематическая карта вечной мерзлоты по типам географического ее распространения».

Подходы к исследованию грунтовых дорог и почвенно-грунтовых материалов русских специалистов, показанные на Выставке, обратили на себя внимание представителей из Америки, Бразилии, Аргентины, с которыми завязались научные контакты.

В июне 1927 г. в Вашингтоне состоялся I Международный почвенный конгресс, на который съехалось около 500 участников (делегация из СССР включала 18 человек).

Российская сторона подготовила 13 бюллетеней, включающих разработки и основные достижения ведущих почвоведов страны. Среди них была работа Н. И. Прохорова о роли почвоведения при строительстве автомобильных дорог в СССР [25], представленная на секции прикладного почвоведения. В докладе говорилось об организации и полевых дорожно-грунтовых работах Исследовательского бюро. Однако личное участие Н. И. Прохорова в работе I конгресса почвоведов не состоялось.

Совместные работы советских инженеров и почвоведов были замечены за рубежом и высоко оценены научным сообществом. Так, основополож-



Рис. 4. Профессора Ленинградского университета — минералог П. А. Земятченский и почвовед Н.И. Прохоров — основоположники ленинградской школы грунтоведения

ник механики грунтов Карл Терцаги отмечал, что «русский метод изучения грунтов имеет свои преимущества» и «можно избежать неудач и напрасного труда, если детально познакомиться с работой русских исследователей». В статье Терцаги о достижениях русских в вопросах дорожного дела (журнал «Public Roads») было написано: «Из докладов, представленных Конгрессу, стало очевидным, что методы, применяемые почвоведом, требуют еще значительных видоизменений для приложения их к дорожному делу. В то же время мы узнали, что русские дорожные инженеры, в тесном сотрудничестве с почвоведом, по-видимому, уже находятся на пути к разработке этих изменений. Благодаря им, почвенные исследования могут быть использованы с полным успехом. Поэтому весьма желательно тщательное изучение современных русских методов дорожных исследований» [15].

Специалисты дорожного дела понимали, что в условиях Советского Союза, где из всех видов дорог только 0,6% занимали дороги с прочной одеждой, грунтовым дорогам придется уделять повышенное внимание.

В июле 1928 г. в Москве состоялся Всероссийский дорожный съезд, на котором обсуждали вопросы дорожного дела и дорожного хозяйства Советского Союза. В результате работы съезда были составлены перспективы развития дорожного хозяйства страны, которые послужили мощным толчком к развитию в СССР разветвленной сети усовершенствованных дорог. В докладе Б. П. Жерве о научно-исследовательской работе Бюро [1] говорилось, что «Ни в Германии, ни во Франции нет такого разнообразия почвенных и климатических условий, как в нашем Союзе, поэтому у нас не может быть стандарта, единых методов и способов разрешения дорожных проблем. Раньше, чем строить, надо изучить и учесть технические и естественно-исторические обстоятельства». Затем Борис Петрович предложил преобразовать Исследовательское бюро ЦУМТ в дорожный институт и создать развитую сеть опытно-исследовательских станций. В докладе профессора Н. Н. Иванова было отмечено, что типы дорог должны выбираться в соответствии с местными условиями: клинкер, например, в местностях, бедных камнем и богатых глиной. Булыжные дороги он назвал варварскими.

Дорожная секция обсуждала вопрос о постройке дорог усовершенствованных типов с применением новых строительных материалов (битумов, асфальтов, гудронов, силикатов и пр.) и о новых методах улучшения грунтовых дорог с широкой механизацией работ. Съезду был представлен обзор дорожного хозяйства за границей, его финансирование, оснащение дорожных работ машинами и материалами [1].

В 1929 г. Исследовательское дорожное бюро было реорганизовано в научно-исследовательский автомобильно-дорожный институт (НАДИ) Центрального научно-исследовательского управления Народного комиссариата путей сообщений (ЦНИУ НКПС). В его функции входили научно-исследовательские работы в области дорожного и автомобильного строительства во всесоюзном масштабе.

Директором НАДИ был назначен Г. Д. Дубелир (профессор Ленинградского института инженеров путей сообщения (ЛИИПС)). Его помощником по технической части стал Н.Н. Иванов. Основные сотрудники Бюро — П. А. Земятченский, В. А. Кондрашков, В.В. Охотин, М. И. Сумгин — становятся научными сотрудниками института НАДИ.

В 1930 г. НАДИ был реорганизован в Центральный научно-исследовательский институт автодорожного транспорта (ЦИАТ) Народного комиссариата путей сообщений (с 1932 г. — Центральный научно-исследовательский институт автогужевого дорог и дорожных сооружений). В этом же году

создан целый ряд автомобильно-дорожных учебных институтов в Ленинграде (ЛАДИ), Москве (МАДИ), Сибири (СибАДИ), Саратове (САДИ), Харькове (ХАДИ). В 1936 г. в Москве на базе Главдортранса РСФСР создан Государственный дорожный научно-исследовательский институт (ДорНИИ) Гушосдора НКВД СССР с функциями центрального института.

Ко Второму Международному конгрессу почвоведов в июле 1930 г., проходившему в Советском Союзе на площадках Ленинграда и Москвы, автодорожным институтом была подготовлена выставка «Дорожное почвоведение» с путеводителем на русском и английском языках. Экспонаты включали многочисленные образцы почв, рисунки, фотографии и карты по почвенно-климатическим зонам, а также коллекции почвенных карт других стран.

В своих воспоминаниях П.А. Земятченский писал [5] об исследованиях в области выработки универсальных методов механического анализа грунтов, проводимых по постановлению II Международного конгресса почвоведов в 1930 г. Эти исследования все-таки не привели к ясному и определенному выводу о преимуществах того или иного метода. Сотрудниками Исследовательского дорожного бюро был разработан комбинированный метод Сабанина-Робинзона, получивший повсеместное распространение в СССР [8, 22].

Несмотря на короткий период существования Исследовательского дорожного бюро ЦУМТ, в результате его деятельности сложилось новое междисциплинарное направление — дорожное почвоведение, которое в свою очередь наметило четкую траекторию к еще только зарождающейся науке о грунтах — грунтоведению.

В России в тот период ощущалась нехватка специально подготовленных геологов для решения задач дорожного (в первую очередь) и других видов строительства. Развитие дорожного исследовательского дела требовало поставить на постоянную основу подготовку научно-исследовательских кадров.

### **Кафедра дорожного почвоведения ЛГУ**

В Ленинградском государственном университете в конце 20-х годов уже существовали несколько специализированных лабораторий (геологическая, кристаллографическая, петрографическая, агрономическая, минералогическая). По договоренности между ЛГУ и НАДИ, в университете организуется кафедра дорожного почвоведения, при этом автомобильно-дорожный институт вносит некоторую сумму денег для дооборудования лаборатории

и обеспечивает стипендиями учащихся, выбравших своей специальностью дорожное почвоведение.

Это был период, когда в рамках реформирования высшего образования СССР, университет трясло от ежегодных преобразований. Кафедра возникла на отделении геологии (цикл почвоведения) физико-математического факультета. Заведующим кафедрой был назначен профессор П.А. Земятченский, ассистентом — В. В. Охотин, первым аспирантом становится К.И. Лукашев [12]. По началу это и был весь штат новой кафедры дорожного почвоведения, возникновение которой было связано с новым направлением в дорожном деле, объединяющим почвенные науки и дорожно-строительное дело.

Практический опыт, полученный в Исследовательском дорожном бюро, высокий научный потенциал П. А. Земятченского и его ученика В. В. Охотина позволили им создать устойчивый фундамент новой кафедры. К сожалению, с ними уже не было их коллеги и друга Н.И. Прохорова, отдавшего лучшие годы и творческий потенциал науке и стране (рис. 4).

В. В. Охотин, начавший свою научную деятельность в качестве лаборанта в лаборатории сельскохозяйственного института под началом Н. И. Прохорова, всю свою профессиональную жизнь занимался экспериментальными лаборатор-

ными исследованиями грунтов. Он прошел путь ассистента, доцента, профессора, возглавлял кафедру, которой был безгранично предан.

Творческая деятельность П. А. Земятченского как последователя В. В. Докучаева была связана с почвенными исследованиями. Начиная с 1924 г., он плотно занимался геологическим изучением почв и грунтов, при этом был хорошим химиком-аналитиком. Изучая физико-механические свойства грунта (для определения его строительных свойств), Петр Андреевич разработал гранулометрический анализ грунтов, изучал битумы, которые использовались в дорожном строительстве, занимался созданием искусственных камней — клинкеров.

В. И. Вернадский вспоминал как «До самой своей смерти П. А. Земятченский был профессором грунтоведения, новой науки, кафедра которой была создана в Ленинградском университете по его инициативе и при поддержке Дорожного института. Впоследствии эта кафедра перешла в ведение Наркомпроса РСФСР, в ней числилось до 10 преподавателей» [2].

В составе университета кафедра получила название кафедры грунтоведения (1931 г.), университетские традиции позволили развернуть всестороннее углубленное изучение грунтов. Таким образом, в сентябре 1930 г. возникла первая в мире



Рис. 5. Основной состав кафедры грунтоведения, 1938 г.

Слева направо в 1 ряду: неизвестный, К. И. Лукашев, П. А. Земятченский, В. В. Охотин, Ш. Ф. Бутс, во 2 ряду: неизвестный, И. А. Дубинин, А. А. Владимирский, Г. Г. Тюменев, неизвестный

кафедра грунтоведения, ее появление сыграло большую роль в развитии грунтоведения как науки. Именно в ЛГУ впервые в стране был открыт прием на специальность «Грунтоведение». В 1933 г. появился первый русский учебник по грунтоведению, написанный К. И. Лукашенко [13]. Вскоре на 16 линии Васильевского острова заработала лаборатория грунтоведения.

Создатели кафедры — П. А. Земятчинский и В. В. Охотин, а также трагически погибший Н. И. Прохоров по праву — основоположники русской школы грунтоведения.

На рисунке 5 представлена единственная сохранившаяся довоенная фотография основного состава сотрудников кафедры грунтоведения ЛГУ (1938 г.).

В настоящее время кафедры грунтоведения в Санкт-Петербургском университете не существует. С 1965 г. (при заведовании Анатолия Кон-

стантиновича Ларионова) и до наших дней кафедра носила название — кафедра инженерной геологии.

В 2022 г. руководство СПбГУ приняло решение о слиянии кафедры инженерной геологии с кафедрой гидрогеологии (Приказ СПбГУ № 9845/1 от 20.09.2022). В результате появилась комплексная кафедра — гидрогеологии и инженерной геологии.

Историю направления «Инженерная геология» ЛГУ (СПбГУ) можно найти на сайте Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета: [https://earth.spbu.ru/netcat\\_files/userfiles/inzh.\\_geologiya\\_.pdf](https://earth.spbu.ru/netcat_files/userfiles/inzh._geologiya_.pdf).

При подготовке данной статьи использованы материалы музея СПбГУ, объединенного архива СПбГУ, центрального государственного архива Санкт-Петербурга, музея почвоведения им. В. В. Докучаева, ресурсы интернет.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автодор РСФСР. Дорожный съезд / Тезисы докладов на Первом дорожном съезде Автодора. М.: 17-я тип. «Мосполиграф», 1928. 48 с.
2. Вернадский В. И. О науке. Том 1. Научное знание. Научное творчество. Научная мысль. Дубна: Изд. центр «Феникс», 1997. 576 с.
3. Жерве Б. П. Планы и перспективы дорожного дела в Западной Европе / Отдел III. Экономика и техника в журнале «Плановое хозяйство», № 11, ноябрь 1928. С. 233–244.
4. Жерве Б. П. и др. Временное руководство по грунтовым дорогам. Изыскания, проектирование, постройка, содержание и ремонт / ЦУМТ. Исслед. дорожн. бюро. Л., 1929. 224 с.
5. Земятчинский П. А. История возникновения и организация кафедры грунтоведения Ленинградского университета / Музей истории СПбГУ. Дело 410, 1939. 7 с.
6. Земятчинский П. А. К вопросу о физико-механических свойствах грунтов / Грунты и почвы в дорожном деле: Полевые и лабораторные исследования научно-исследовательского дорожного бюро ЦУМТ // Сб. Отдела шоссейных и грунтовых дорог НКПС ЦУМТ. Вып. 13. М.: 2-я тип. Транспечати НКПС, 1926. С. 26–30.
7. Земятчинский П. А. Клинкер в СССР / НКПС ЦУМТ. Исследовательское дорожное бюро ЦУМТ. Лаборатория. Л.: 2-я тип. Транспечати НКПС, 1929. 40 с.
8. Земятчинский П. А., Охотин В. В. О механическом анализе обломочных рыхлых пород по методу Робинсона / Дорожные исследования. Труды Исследовательского дорожного бюро НКПС ЦУМТ, Исслед. дорожн. бюро. Вып. 19. Л.: 2-я тип. Транспечати НКПС, 1928. С. 723.
9. Иванов Н. Н. К вопросу о постановке технических испытаний грунтов / Грунты и почвы в дорожном деле: Полевые и лабораторные исследования научно-исследовательского дорожного бюро ЦУМТ // Сб. Отдела шоссейных и грунтовых дорог НКПС ЦУМТ. Вып. 13. М.: 2-я тип. Транспечати НКПС, 1926. С. 94–117.
10. Иванов Н. Н., Пашков Л. В. Графический способ нахождения наилучших смесей грунтов и гравия / ЦУМТ. Исслед. дорожн. бюро. Л., 1929. 27 с.
11. Иванов Н. Н. Пояснения графических экспонатов на международной дорожной выставке в Милане в 1926 / ЦУМТ. Исслед. дорожн. бюро. Л., 1929. 10 с. (русс., англ., фр.).
12. Каюкова Е. П. 100 лет Ленинградской школы грунтоведения / Мат-лы XLIII Межд. научн. конф. Санкт-Петербургского отделения Российского нац. комитета по истории и философии науки и техники РАН, СПб, 24–28 октября 2022 г. Вып. XXXVIII. СПб: Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, Скифия-принт, 2022. С. 156–157.
13. Лукашев К. И. Грунтоведение: учебник / Под ред. проф. П. А. Земятчинского. Л.: Кубуч, 1933. 223 с.
14. Лукашев К. П. Грунтоведение как наука и роль Ленинградского университета в ее развитии / Музей истории СПбГУ. 1939. 19 с.
15. Обзор иностранной печати / Труды исслед. бюро ЦУМТ. 1928. Вып. 19. (Дорожные исследования).

16. Организация научно-исследовательских дорожных работ в ЦУМТе (1923–1925 гг.) / Грунты и почвы в дорожном деле: Полевые и лабораторные исследования Научно-исследовательского дорожного бюро ЦУМТ // Сб. Отдела шоссейных и грунтовых дорог НКПС ЦУМТ. Вып. 13. М.: 2-я тип. Транспечати НКПС, 1926. С. 287–316.
17. Охотин В. В. Задачи современного грунтоведения / Вестник Ленингр. ун-та, № 3, 1947. С. 54–63.
18. Охотин В. В. Испытание грунтов на опытной дороге / Дорожные исследования. Труды Исследовательского дорожного бюро // НКПС ЦУМТ, Исслед. дорожн. бюро. Вып. 19. Л.: 2я тип. Транспечати НКПС, 1928. С. 39–50.
19. Охотин В. В. К вопросу о роли гумуса в дорожных грунтах / Грунты и почвы в дорожном деле: Полевые и лабораторные исследования научно-исследовательского дорожного бюро ЦУМТ // Сб. Отдела шоссейных и грунтовых дорог НКПС ЦУМТ. Вып. 13. М.: 2-я тип. Транспечати НКПС, 1926. С. 30–36.
20. Охотин В. В. Лабораторные опыты по исследованию дорожных грунтовых смесей по принципу наименьшей пористости / Лаборатория Исследовательского дорожного бюро ЦУМТ. М.-Л.: 2-я тип. Транспечати НКПС, 1929. 32 с.
21. Охотин В. В. Сопротивление грунтов вдавливанию в зависимости от механического состава / Дорожные исследования. Труды Исследовательского дорожного бюро // НКПС ЦУМТ, Исслед. дорож. бюро. Вып. 19. Л.: 2-я тип. Транспечати НКПС, 1928. С. 24–38.
22. Охотин В. В., Смирнова О. Ф. Гранулометрический (механический) анализ грунтов по методу Робинзона / В сб.: Грунты, грунтовые и гравийные дороги. Л.-М. 1932. С. 143–56.
23. Прохоров Н. И. Дорожные почвенно-грунтовые исследования. Их возникновение, цели и задачи / Исследовательское дорожное бюро НКПС ЦУМТ. Л.: Изд. Исслед. бюро ЦУМТа, 1928. IV, 56 с.
24. Associazione internazionale permanente dei congressi della strada. Quinto congresso internazionale della strada, Milano, 1926. Rendiconto dei lavori del congresso (Rennes-Paris: Oberthur, 1927).
25. Prokhorov N. I. Soil Science in the Construction of Highways in USSR (Russian Pedological Investigations. no. 12.) Unknown Binding — 1 Jan. 1927.
26. Vth World Road Congress. Milan 1926. Proceedings of the Congress / Дата обращения 1.02.2022. URL: <https://www.piarc.org/en/activities/World-Road-Congresses-World-Road-Association/Congress-Proceedings/milan-1926/proceedings.htm>

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

1. **Аманова Гульмира Сапаргельдыевна**, Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, младший научный сотрудник,  
Россия, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13 стр. 2; геологический факультет Московского государственного университета (МГУ) им. М. В. Ломоносова, ведущий инженер,  
Россия, 119234, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, тел. +7 (901) 389-52-24  
131597tupac@mail.ru
2. **Большаков Илья Евгеньевич**, геологический факультет Московского государственного университета (МГУ) им. М. В. Ломоносова, кафедра инженерной и экологической геологии, инженер I категории,  
Россия, 119234, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1 тел. +7 (916) 701-04-95  
bolshakov.ilya.210@yandex.ru
3. **Борисова Валерия Петровна**, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра почвоведения и экологии почв, студентка магистратуры 2-го года обучения,  
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 16-линия В.О., д. 29,  
red\_fox71113@mail.ru
4. **Вознесенский Евгений Арнольдович**, доктор геолого-минералогических наук, директор Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,  
Россия, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13 стр. 2, тел. +7 (495) 623-31-11,  
eugene@geoenv.ru
5. **Жилкибаев Орал Танкиевич**, доктор химических наук, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, кафедра органических веществ, природных соединений и полимеров, профессор, Республика Казахстан, 050040, Алматы, проспект Аль-Фараби, д. 71  
zhilkibaevoral@mail.ru
6. **Зеркаль Олег Владимирович**, кандидат геолого-минералогических наук, геологический факультет Московского государственного университета (МГУ) им. М. В. Ломоносова, старший научный сотрудник,  
Россия, 119234, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, тел.: +7 (916) 701-04-95,  
igzov@mail.ru
7. **Казеев Андрей Игоревич**, кандидат геолого-минералогических наук, Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, ведущий научный сотрудник,  
Россия, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13 стр. 2 (а/я 145 ИГЭ РАН),  
kazeev@yandex.ru
8. **Карпенко Фёдор Сергеевич**, кандидат геолого-минералогических наук, Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, заведующий лабораторией изучения состава и свойств грунтов,  
Россия, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13 стр. 2, тел. +7 (495) 700-72-61,  
kafs08@bk.ru



9. **Каюкова Елена Павловна**, кандидат геолого-минералогических наук, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра гидрогеологии и инженерной геологии, доцент,  
Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9, тел. +7 (981) 742-68-75, еркаю@gmail.com
10. **Кучуков Марат Мухамедович**, Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, ведущий научный сотрудник,  
Россия, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13 стр. 2 (а/я 145 ИГЭ РАН),  
kuchukov.m@gubkin.ru
11. **Кызин Андрей Александрович**, Башкирский государственный аграрный университет, кафедра почвоведения, агрохимии и точного земледелия, аспирант,  
Россия, 450001, Республика Башкортостан, Уфа, улица 50 лет Октября, д. 34,  
saimonnord@yandex.ru
12. **Леонтьев Александр Алексеевич**, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра почвоведения и экологии почв, студент магистратуры 1-го года обучения,  
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 16-линия В.О., д. 29,  
dasher678@gmail.com
13. **Ошмарина Александра Константиновна**, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра почвоведения и экологии почв, студентка 4-го курса,  
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 16-линия В.О., д. 29,  
st076421@student.spbu.ru
14. **Попов Александр Иванович**, доктор сельскохозяйственных наук, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, профессор кафедры почвоведения и экологии почв,  
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 16-линия В.О., д. 29, тел. 8 (812) 328-33-62,  
a.i.popov@spbu.ru, paihumic@gmail.com
15. **Постоев Герман Павлович**, доктор технических наук, Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, главный научный сотрудник,  
Россия, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13 стр. 2 (а/я 145 ИГЭ РАН), тел. +7 (495) 607-46-23,  
opolzen@geoenv.ru
16. **Романов Олег Васильевич**, кандидат биологических наук, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра почвоведения и экологии почв, доцент,  
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 16-линия В.О., д. 29,  
ov\_romanov@mail.ru
17. **Сазанова Екатерина Витальевна**, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра почвоведения и экологии почв, аспирант,  
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 16-линия В.О., д. 29,  
katya97vs@yandex.ru
18. **Симонова Юлия Владимировна**, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра почвоведения и экологии почв, ассистент,  
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 16-линия В.О., д. 29,  
Uvsim@yandex.ru

19. **Фролова Юлия Владимировна**, доктор геолого-минералогических наук, геологический факультет Московского государственного университета (МГУ) им. М. В. Ломоносова, доцент, Россия, 119234, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, тел.: +7 (916) 701-04-95, ju\_frolova@mail.ru
20. **Холостов Георгий Дмитриевич**, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра почвоведения и экологии почв, аспирант, Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 16-линия В.О., д. 29, kholostov14@mail.ru
21. **Цивка Ксения Игоревна**, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, кафедра почвоведения и агрохимии имени Л. Н. Александровой, аспирант, Россия, 196601, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2, ks.tsivka@gmail.com
22. **Шалунова Екатерина Петровна**, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра геоэкологии, старший преподаватель, Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9, katerina13@mail.ru

---

Сдано в набор: 23.12.2023 Подписано в печать: 29.12.2023 Формат бумаги: 60x88 1/8  
Цифровая печать. Тираж 50 экз.

---

Учредитель: Охотинское общество грунтоведов

Отпечатано в типографии «СВЕН»



