



Научная статья
УДК 550.8.05:624.131.3

Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учета данных инженерной геофизики

В.В.ГЛАЗУНОВ¹, С.Б.БУРЛУЦКИЙ²✉, Р.А.ШУВАЛОВА³, С.В.ЖДАНОВ⁴

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ ООО «Промтterra», Москва, Россия

⁴ АО «Полиметалл Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Глазунов В.В., Бурлуцкий С.Б., Шувалова Р.А., Жданов С.В. Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учета данных инженерной геофизики // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 771-782. DOI: 10.31897/PMI.2022.86

Аннотация. Оползни относятся к числу наиболее опасных геологических процессов, представляя угрозу для всех инженерных сооружений. С целью оценки устойчивости склонов применяются комплексные инженерные изыскания, результаты которых необходимы для выполнения расчетов устойчивости грунтовых масс и оценки рисков развития оползневых процессов. Приведены результаты комплексных геолого-геофизических исследований типичного оползневого склона отрогов гор Северо-Западного Кавказа, сложенного глинистыми грунтами. Цель работы – повышение достоверности оценки устойчивости оползневого массива за счет построения объемной 3D-модели склона, включающей его основные структурные элементы, выделенные с помощью современных методов инженерной геофизики. Учет геофизических данных при формировании расчетной 3D-модели склона позволил обозначить важные структурные элементы оползня, что существенным образом отразилось на корректности расчета его устойчивости.

Ключевые слова: оползни; оползневые склоны; геофизические исследования оползней; электрическая и сейсмическая томография; расчет устойчивости склона; коэффициент запаса устойчивости; поверхность скольжения

Поступила: 17.03.2022

Принята: 04.10.2022

Онлайн: 02.11.2022

Опубликована: 10.11.2022

Введение. Оценка эксплуатационной надежности построенных и проектируемых инженерных сооружений на склонах основывается на представлениях о детальном строении и напряженно-деформированном состоянии грунтового массива, а также выявлении факторов, влияющих на формирование и развитие оползневых процессов, и показателях, характеризующих устойчивость склонов [1].

Степень опасности склонов для строительства определяется на основе инженерно-геологических моделей, характеризующих вероятное расположение основных структурных элементов оползневых смещений, пространственное распределение напряженно-деформированного состояния, прочностных и физических свойств оползневого массива [2-4]. Особое значение при этом следует уделять детальности исследований грунтовых толщ [5-7]. Повышение детальности исследований позволяет выявить факторы, существенно влияющие на оценку устойчивости оползневого склона. Это наличие линз и тонких слоев, к которым могут быть приурочены поверхности скольжения, сложность рельефа оползневого ложа, многочисленные трещины, пересекающие тело оползня [1, 8]. Такое требование обуславливает необходимость проведения обоснованной интерполяции данных о геологическом строении в пределах межскважинного пространства. Выполнению качественной интерполяции геологических границ с выделением локальных структурных элементов в оползневом массиве препятствует значительное расстояние между скважинами. Велика вероятность пропуска структурных элементов оползневых смещений. Кроме того, на качество



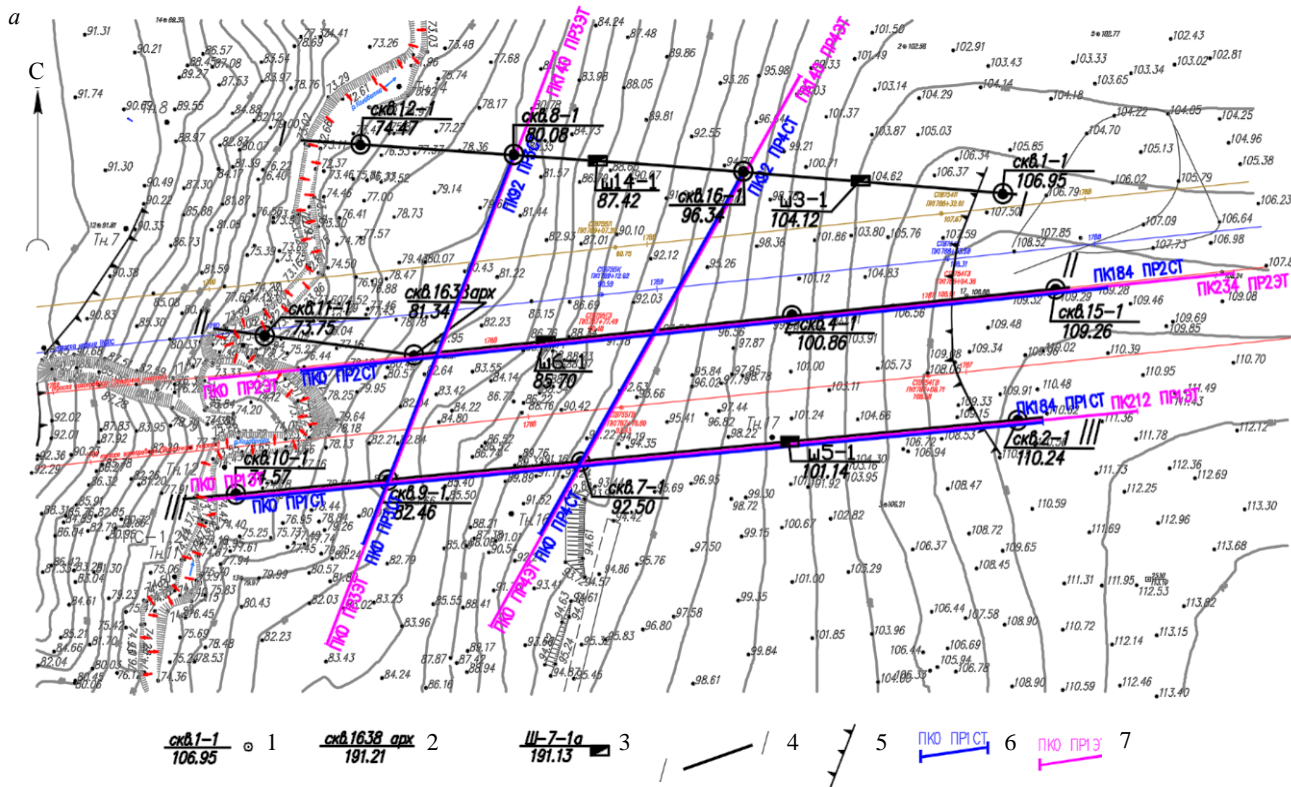
интерполяции существенным образом влияют условия проведения работ по проходке инженерно-геологических выработок. Так, зачастую из-за сложности выполнения бурения на крутых склонах инженерно-геологические скважины заменяются шурфами, которые, несмотря на свои преимущества, не позволят достичь необходимой глубины исследований. Поэтому расстояние между скважинами на профиле может достигать 100 м (рис.1). Проведение корректной геологической интерполяции при редкой сети скважин и горных выработок с учетом всей совокупности факторов, влияющих на устойчивость оползневого склона, возможно с использованием современных методов инженерной геофизики, которые позволяют получить практически непрерывные 2D-геолого-геофизические разрезы. Повышению достоверности оценки устойчивости склона способствует также построение объемных 3D-моделей с выделением основных элементов оползня, включая локализацию зон ослабленных грунтов, и определение пространственного распределения физико-механических свойств в грунтовом массиве.

Согласно действующей нормативной документации (СП 420.1325800.2018) инженерно-геологические расчеты устойчивости склонов рекомендовано выполнять в 2D-постановке для профиля, ориентированного по наиболее вероятному направлению смещения оползня, вдоль максимального уклона поверхности склона. Однако методика 2D-постановки задачи не учитывает возможные смещения, которые могут произойти вне плоскости расчетного профиля. Воздействие различных факторов, в том числе результаты инженерно-хозяйственной деятельности человека, неоднородная геологическая структура оползневого массива, а также специфический рельеф поверхности склона, может привести к формированию сложного характера поля напряженно-деформируемого состояния грунтового массива и создать траекторию смещения оползня, не соответствующую расчетной линии склона [9, 10].

Получить картину более вероятного оползневого смещения грунтов и, соответственно, повысить точность оценки устойчивости грунтовых масс позволяет анализ 3D-модели склона. По сравнению с плоскими 2D-моделями объемные дают более полное и корректное представление о строении основного деформируемого горизонта на основе учета пространственной формы и расположения плоскостей смещения, линий оползневых трещин, стенок отрыва, валов выпирания и оползневых террас в пределах формирующегося оползневого цирка [11, 12]. Эти данные позволяют определить пространственное распределение коэффициента устойчивости склона с учетом 3D-аппроксимации его строения. Для формирования более адекватной 3D-модели и повышения достоверности оценки устойчивости оползневого склона следует обязательно использовать комплексную геолого-геофизическую информацию о его детальном геологическом строении.

Для расчетов устойчивости склона с помощью 3D-модели использовалась программа Slide3 (канадской компании Rocscience Inc [13]), которая основана на аппроксимации грунтового массива расчетными трехмерными блоками. При переходе от 2D- к 3D-постановке задачи методом предельного равновесия полностью меняется концепция описания формы поверхности скольжения [14]. Например, круглоцилиндрическая поверхность скольжения в двумерной 2D-постановке задачи синтезируется как сферическая или эллипсоидальная при переходе к 3D-модели. В 3D-задаче при расчете устойчивости учитывается предельное равновесие удерживающих и сдвигающих сил в двух ортогональных направлениях. Вертикальная нагрузка определяет перпендикулярные и касательные силы, действующие на основании каждого расчетного блока модели. Значения сил, сдвигающих и противодействующих смещению, определяют результирующий коэффициент запаса устойчивости для расчетной трехмерной поверхности скольжения [13, 15]. В целом моделирование в 3D-постановке позволяет получить более корректные характеристики устойчивости склона в сравнении с 2D-подходом [14, 16].

В последнее время для изучения оползней широко применяются электротомография (ЭТ) и сейсмотомография (СТ), предоставляющие наиболее полную и детальную информацию о геолого-геофизическом строении оползневых структур [17]. В отличие от 1D-способов изучения склона с помощью скважин и шурфов, современные 2D-геофизические технологии позволяют получить практически непрерывный разрез оползневого склона с указанием основных структурных элементов оползневого массива и локализовать ослабленные зоны, связанные с формированием трещин и повышенной влажностью грунтов [18-20].



б

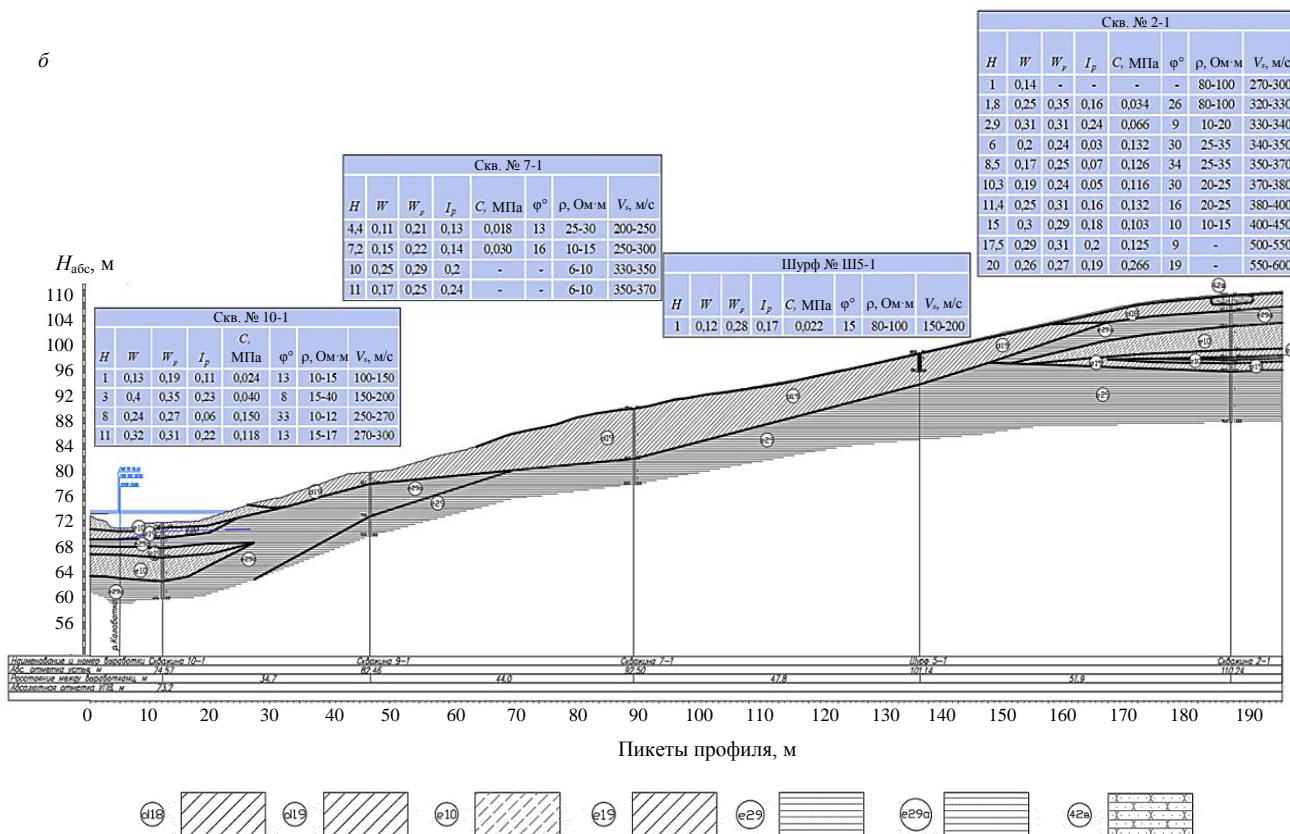


Рис.1. План размещения инженерно-геологических выработок и геофизических профилей (а) и инженерно-геологический разрез по линии III-III (б)

1 – геологическая скважина, ее номер, абс. отметка устья, м; 2 – архивная геологическая скважина, ее номер, абс. отметка устья, м; 3 – шурф, его номер, абс. отметка устья, м; 4 – линия и номер инженерно-геологического разреза; 5 – граница оползня длительной стабилизации по данным инженерно-геологических изысканий; 6 – профили сейсмоотографии; 7 – профили электроотографии



Методология. Объектом 2D- и 3D-моделирования является оползневой склон, расположенный на северо-восточном понижении Северо-Западного Кавказа. Оползень генетически связан с процессом формирования водотока. Базисом оползня является русло реки (рис.1, б). Средний уклон поверхности склонов – 11-15°. Стенки отрыва оползня и его борта четко не прослеживаются в связи с наличием густой растительности и задернованности склона. Поверхность языка оползня сглажена и в русловой части размыта временным водотоком. Рельеф в верхней части склона более пологий, а ближе к водотокам наблюдается его перегиб, приводящий к увеличению уклона до 15-25°. В этой области отмечаются слабозадернованные бровки срыва, «пьяный» лес, а в отдельных местах и неглубокие промоины. На оползневом склоне геоморфологические элементы выражены слабо.

Геологический разрез изучаемого оползневого участка (рис.1, б) представлен в основном четвертичными отложениями [21]. Верхняя часть разреза до глубины 8 м сложена отложениями делювиальных суглинков, представленных следующими литологическими разностями: суглинок желто-бурый тяжелый песчанистый твердый (d18); суглинок светло-серый тяжелый песчанистый твердый с прослоями слабосцементированного песчаника до 3-5 мм (d19). Суглинки залегают на следующих разновидностях элювиальных глин: глина от темно-бурой до светло-серой, легкая пылеватая твердая, с остатками растительности (e29); глина голубовато-серая легкая пылеватая полутвердая плотная (e29a). В верхнем и нижнем интервалах склона отмечаются линзы супеси элювиального генезиса светло-серой твердой плотной со стяжениями карбонатов и ракушки до 10 % (e10) и суглинков желто-бурых тяжелых песчанистых твердых (e19). Скважиной 2-1 в верхней части разреза вскрыта линза песчаника темно-желтого малопрочного слабожелезненного выветрелого слабосцементированного (42в).

По материалам инженерно-геологических исследований отмечается увеличение влажности и пластичности глинистых грунтов с глубиной, при этом показатель консистенции в основном меньше нуля. На границе суглинков и подстилающих их элювиальных глин в некоторых инженерно-геологических выработках, расположенных в центральной части разреза, прослеживается увеличение влажности. Показатель консистенции в этой зоне достигает 0,22, а величины влажности максимально приближаются к границе раскатывания [22].

В результате проведения полевых и лабораторных исследований грунтов оползневого массива определены прочностные характеристики по схеме неконсолидированного среза (см. таблицу). Значения прочностных свойств увеличиваются с глубиной, что характерно для оползневых склонов [14, 23, 24].

Физико-механические свойства грунтов

Инженерно-геологические элементы	Сцепление C , кПа	Угол внутреннего трения φ , град	Плотность грунта при естественной влажности ρ , г/см ³	Предел прочности в сухом состоянии $R_{с,сух}$, МПа	Предел прочности в водонасыщенном состоянии $R_{с,вод}$, МПа
d19	23	16	1,8	–	–
d18	40	15	1,7	–	–
e10	131	32	1,95	–	–
e19	31	15	1,89	–	–
e29	112	16	1,94	–	–
e29a	101	15	1,9	–	–
42в	–	–	1,93	23,46	16,8

Инженерно-геологические данные, полученные в скважинах и шурфах, в совокупности с результатами электро- и сейсмотомографических исследований позволили сформировать 3D-модель оползневого склона, а также выполнить анализ влияния на расчетную величину устойчивости оползневого склона локальных областей ослабленных пород оползневого массива, выделяемых с помощью геофизических методов.

Анализируя признаки проявления оползневой активности рассматриваемого склона (оползневой рельеф, слабозадернованные бровки срыва, «пьяный» лес), можно с уверенностью утверждать сформированность оползня и активное протекание оползневого процесса. Как показывает



практика, при наличии указанных признаков склоны находятся в состоянии, близком к предельному равновесию. Коэффициенты устойчивости таких склонов, как правило, не превышают 1,1.

Результаты расчета устойчивости склона на основании инженерно-геологических изысканий. Руководствуясь информацией о составе, влажности и свойствах грунтов оползневого склона, полученной по данным инженерно-геологических изысканий, сформирована расчетная 3D-инженерно-геологическая модель оползневого склона. Приведенные в настоящей статье расчеты выполнены для примера без учета возможных сейсмических воздействий. Для сравнительного анализа результатов 3D- и 2D-моделирования построены расчетные инженерно-геологические модели оползневого склона по параллельным профилям II-II и III-III.

На рис.2, а отобраны результаты 3D-моделирования, выполненного на основании только данных инженерно-геологических изысканий в программном комплексе Slide3. Цветные контуры на поверхности 3D-модели характеризуют пространственное распределение расчетного коэффициента устойчивости склона [25], цветная шкала – изменения значений этого коэффициента в пределах от 2,72 до 6,00. Минимальный коэффициент устойчивости склона равен 2,72. Полученные значения коэффициента позволяют оценить склон в целом в качестве устойчивого. Наиболее неустойчивая область, выделенная на 3D-модели красным цветом, расположена в центральной части склона, где отмечены скважины 9-1, 1638 арх, 7, вскрывшие слой слабого суглинка d19, мощность которого в этих скважинах изменяется от 2 до 7 м.

Расчет коэффициента устойчивости для 2D-модели оползневого склона по профилю III-III, который пересекает ослабленную зону, выполнен по методу Моргенштерна – Прайса. Такой метод имеет наилучшую сходимость при итерационном расчете, позволяет наиболее точно рассчитать коэффициент запаса устойчивости и построить призму возможного обрушения. Исходными данными для моделирования (рис.3, а) являлись только материалы инженерно-геологических исследований [26, 27]. На разрезе 2D-модели склона изображен результат поиска наиболее вероятной поверхности скольжения с минимальным значением коэффициента устойчивости, рассчитанного с помощью программы Slide2 [28, 29]. Расчетное значение коэффициента устойчивости составило 2,42, что несколько ниже значения $K_{уст}$, рассчитанного для сферической поверхности с помощью программы Slide3 (см. рис.2, а). Отметим, что значение $K_{уст}$ по поверхности скольжения, полученное на параллельном профиле II-II, составило 2,81, что, наоборот, несколько выше значения, вычисленного для 3D-модели склона.

Исходя из практики изучения оползневых процессов, а также предположения, что склон, обладающий всеми признаками оползневой активности, как правило, имеет $K_{уст}$ в пределах до 1,1, можно сделать вывод, что $K_{уст}$, полученные в результате 2D- и 3D-расчетов, имеют завышенные значения.

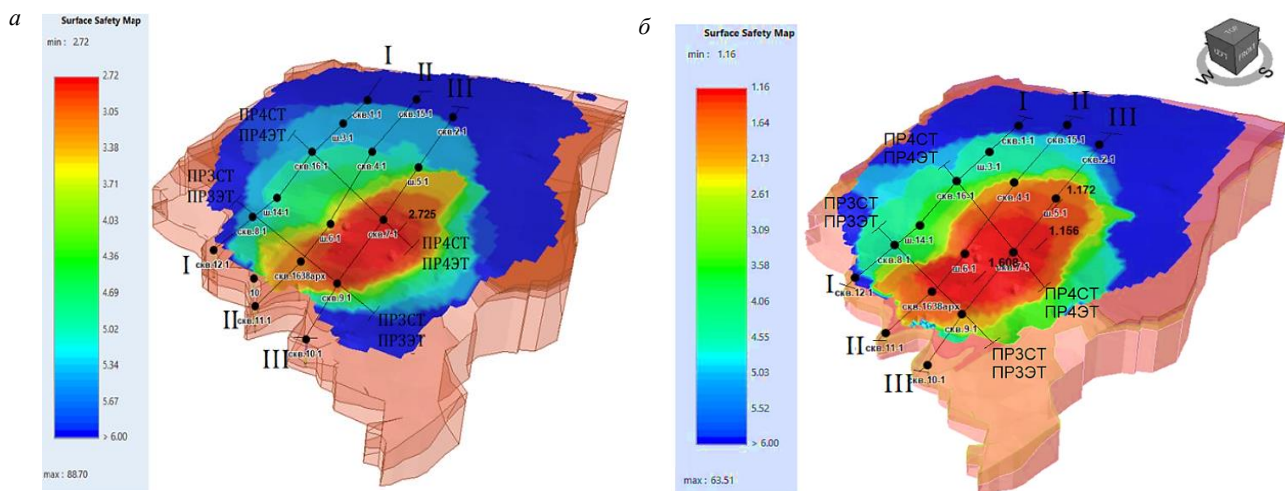


Рис.2. 3D-модель распределения коэффициента устойчивости оползневого склона в программе Slide3 на основании данных инженерно-геологических изысканий (а) и материалов комплексных геолого-геофизических исследований (б)

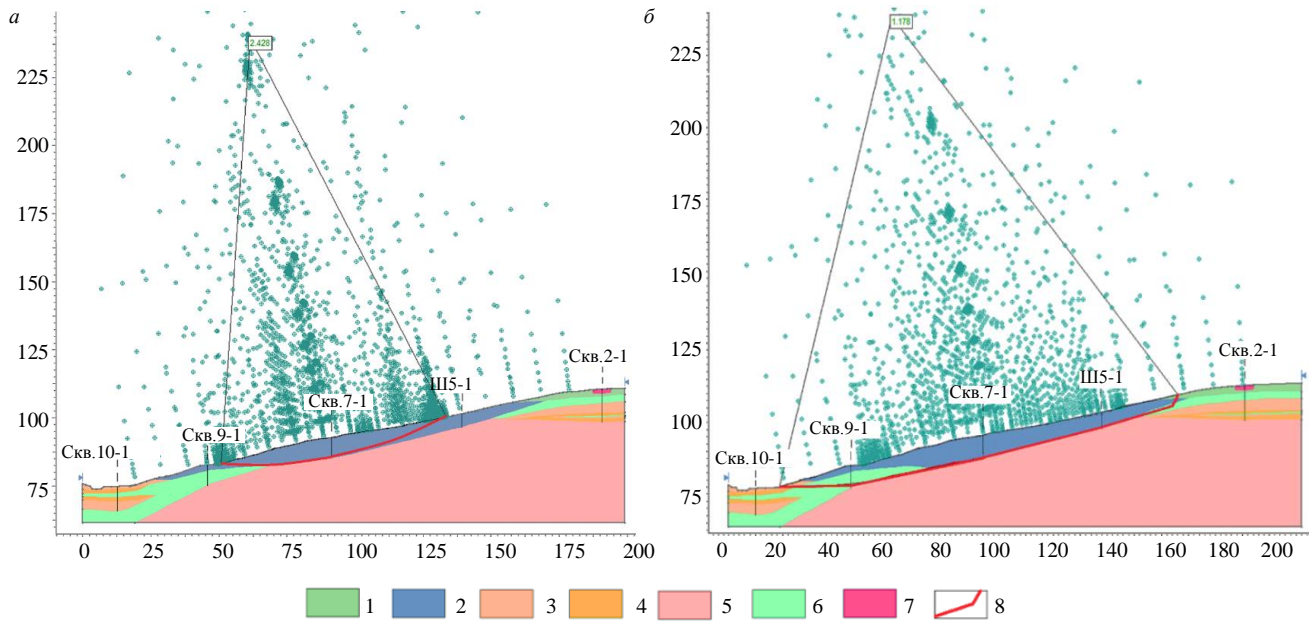


Рис.3. 2D-расчет коэффициента устойчивости оползневого склона по профилю III-III по материалам бурения (а) и данным комплексных геолого-геофизических исследований (б) [30]
 Инженерно-геологические элементы: 1 – d18; 2 – d19; 3 – e10; 4 – e19; 5 – e29; 6 – e29a; 7 – 42в; 8 – зоны поверхности скольжения и трещины отрыва

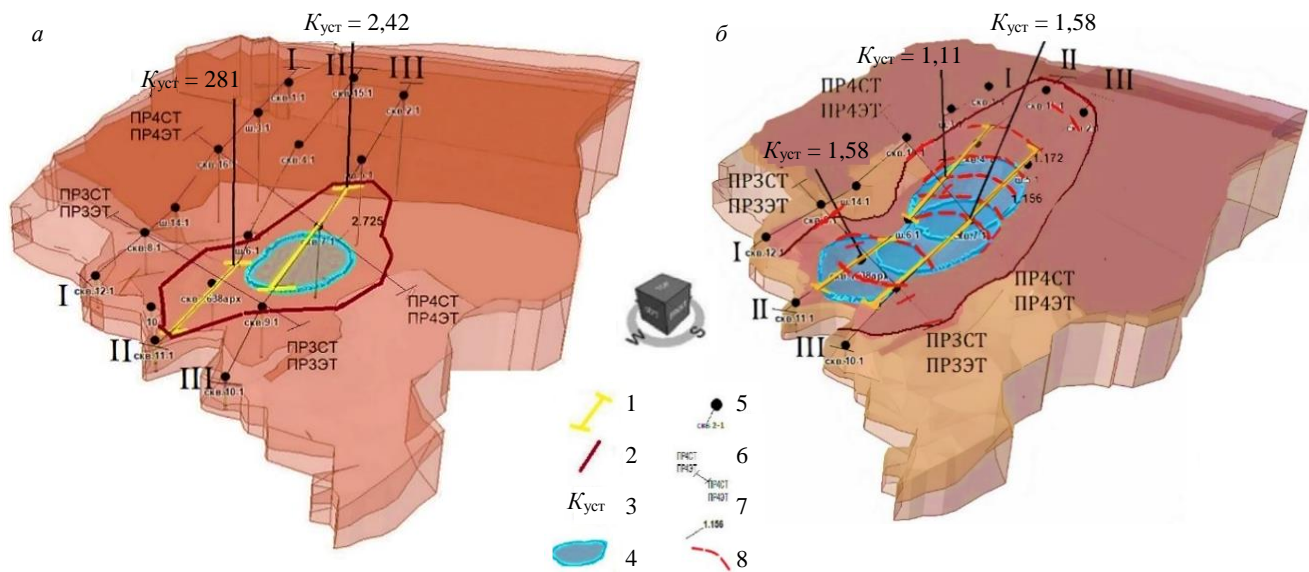


Рис.4. Обобщенная 3D-модель оползнеопасного участка по данным инженерно-геологических изысканий (а) и комплексных геолого-геофизических исследований (б)
 1 – проекция 2D-поверхности скольжения, рассчитанная в Slide2; 2 – граница области наибольшей оползневой опасности; 3 – коэффициент устойчивости, полученный в 2D-расчетах; 4 – 3D-поверхность скольжения оползня; 5 – инженерно-геологические выработки; 6 – профили сейсмической и электрической томографии; 7 – коэффициент устойчивости, полученный в 3D-расчетах; 8 – оползневые трещины

Результаты 2D-расчетов наиболее вероятных поверхностей скольжения по профилям I-I, II-II и III-III были учтены при синтезе 3D-модели с помощью программы Slide3 (рис.4, а). Круглоцилиндрические поверхности скольжения, определенные для 2D-модели, располагаются в пределах наиболее оползнеопасной зоны, выделенной на 3D-модели. При этом наиболее вероятное оползневое смещение по сферической поверхности носит более локальный характер.

Учитывая известные связи между динамическим модулем сдвига и величиной удельного сцепления C глинистых пород, следует считать, что понижение значений скорости поперечных волн V_s в глинистых грунтах свидетельствует об уменьшении их прочности за счет дезинтеграции



и разрушения структурных связей [22]. Это указывает на развитие оползневых смещений и возникновение в грунтовом массиве зон напряженно-деформированного состояния. В силу этих причин глинистые породы, слагающие тело оползня, теряют структурную прочность и в них развиваются трещины [16, 31, 32]. На сейсмотомографических разрезах эти процессы отражаются в виде субвертикальных локальных зон, характеризующих размещение оползневых трещин. Как показывает практика изучения оползневых массивов, значения величин удельного сцепления C и угла внутреннего трения ϕ в этих зонах может снижаться до 50 % по сравнению с ненарушенными грунтами [26, 33].

Последние несколько лет авторы посвятили комплексному геофизическому изучению оползней преимущественно асеквентного типа, расположенных на северных склонах Северо-Западного Кавказа [22, 26, 34]. Как показали выполненные исследования, основными геофизическими методами при изучении пластических оползней являются ЭТ и СТ на поперечных волнах. Комплекс этих геофизических методов позволяет уверенно выделять в разрезе пластического оползня такие важные структурные элементы, как оползневые трещины, проявляющиеся в виде локальных субвертикальных областей пониженных значений удельных электрических сопротивлений (УЭС) и V_s .

Томографические геофизические исследования склонов осуществлены с помощью стандартных методик наблюдений и обработки данных.

Электротомографические наблюдения выполнены с помощью установки Шлюмберже и с использованием многоэлектродной электроразведочной станции «Скала-48». Электроды размещались вдоль косы с шагом 3 м. Обработка данных ЭТ осуществлена методом 2D-инверсии с помощью ПО Res2Dinv, v.4.01.35. Процедура инверсии обеспечила подбор значений УЭС в сеточной 2D-модели среды.

Сейсмические наблюдения проведены с помощью сейсмостанции «ЭЛЛИСС-3». Сейсмоприемники устанавливались с интервалом 2 м. Пункты возбуждения сейсмических волн располагались через 4 м с выносами на половину длины расстановки сейсмоприемников. Сейсмотомографическая обработка выполнена с помощью ПО XТomoDPU и XТomo.

Пространственная разрешающая способность на поверхности составила 1,5 м при электро- и 1 м при сейсмотомографических наблюдениях.

Результаты выполненных электротомографических исследований показали высокую результативность такого метода с целью детального изучения гетерогенной структуры оползня, а также оценки изменения состава и состояния глинистых грунтов (рис.5, а). Анализ полученных электротомографических разрезов оползневого склона позволяет отчетливо проследить изменения влажности, которые обуславливают изменение прочностных параметров тонкодисперсных грунтов. В приповерхностных частях электротомографических разрезов наблюдаются локальные зоны пониженных значений удельных электрических сопротивлений дисперсных грунтов. Данные области связаны с локальным повышением влажности в местах формирования оползневых трещин [22, 26].

Сейсмотомографические разрезы оползневого склона характеризуют двумерное распределение скоростей поперечных волн V_s [26]. Вследствие дезинтеграции глинистых грунтов оползневых массивов на изучаемых сейсмотомографических разрезах поперечных волн выделяются области пониженных значений распределения скоростей V_s , соответствующие таким важным структурным элементам, как трещины в теле оползня (рис.5, б) [22, 35, 36].

Помимо изучения электро- и сейсмотомографических продольных разрезов необходимо учитывать также строение поперечных геолого-геофизических разрезов. На поперечных профилях ЭТ и СТ также отмечаются локальные области пониженных значений УЭС и V_s , соответствующие расположению оползневых трещин. Установлены различия в форме локальных аномалий V_s и ρ на продольных и поперечных разрезах. На продольных геотомографических разрезах эти аномалии и соответственно оползневые трещины имеют наклон в направлении падения склона, а на поперечных разрезах наблюдается разнонаправленный характер их субвертикального залегания (рис.6).

Наклон трещин на продольном и поперечном разрезах уменьшается с глубиной и направлен в сторону протяженной области дезинтегрированных пород тела оползня. Эти различия можно

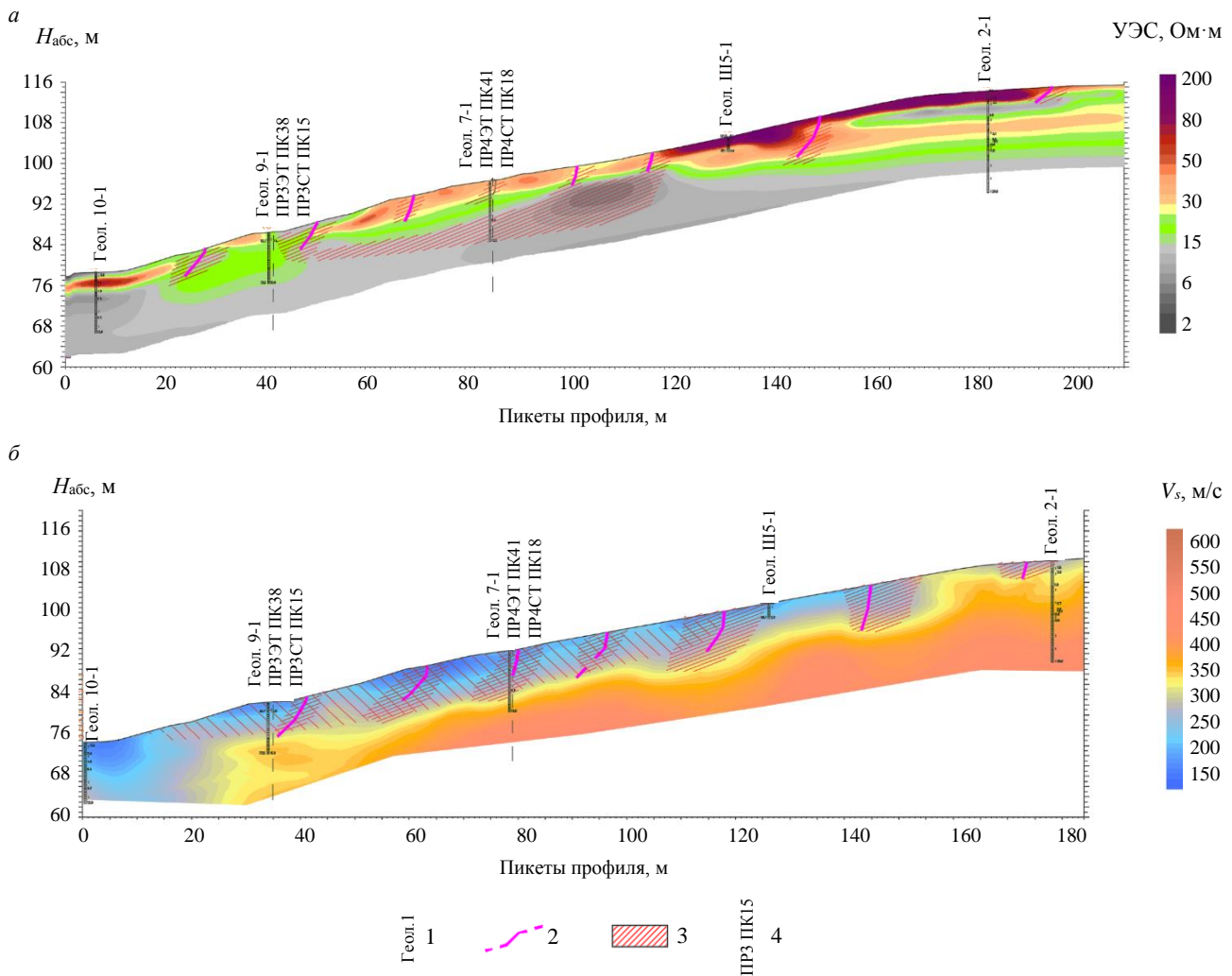


Рис.5. Разрезы электротомографический (а) и скоростной сейсмотомографический поперечных волн V_s (б) по продольному профилю Ш-Ш [26, с изменениями]

1 – номер скважины; 2 – предполагаемые оползневые трещины; 3 – области пониженных значений УЭС и V_s , указывающие на увеличение влажности грунтов и уменьшение величины удельного сцепления; 4 – пересечения геофизических профилей

объяснить тем, что на продольных профилях разрезы ЭТ и СТ позволяют выявить оползневые трещины отрыва, а на поперечных – трещины сдвига, окаймляющие с обеих сторон тело оползня.

Анализ материалов геотомографических исследований оползневого склона совместно с результатами инженерно-геологических изысканий позволил выполнить комплексную интерпретацию [22, 37]. На основе ее результатов скорректировано пространственное положение литологических границ между инженерно-геологическими выработками, выделены зоны ослабленных грунтов, приуроченных к основным структурным элементам оползня, а также осуществлена оценка изменения физико-механических характеристик грунтов в этих зонах.

Согласно комплексной геолого-геофизической интерпретации (рис.6), зона поверхности скольжения оползня преимущественно приурочена к зоне ослабления на границе дисперсных грунтов различного генезиса, гранулометрического состава и консистенции [34]. По классификации Ф.П.Саваренского изучаемый оползень можно отнести к смешанному структурному типу, имеющему элементы как асеквентного, так и консеквентного типов.

Основные структурные элементы оползня выделены по данным совместного анализа ЭТ, СТ и инженерно-геологических разрезов с учетом признаков, указывающих на дезинтеграцию глинистых грунтов и уменьшение их прочности [22]. Результаты электро- и сейсмотомографических исследований также позволили выделить в разрезе оползневого склона трещины различных оползневых циклов.

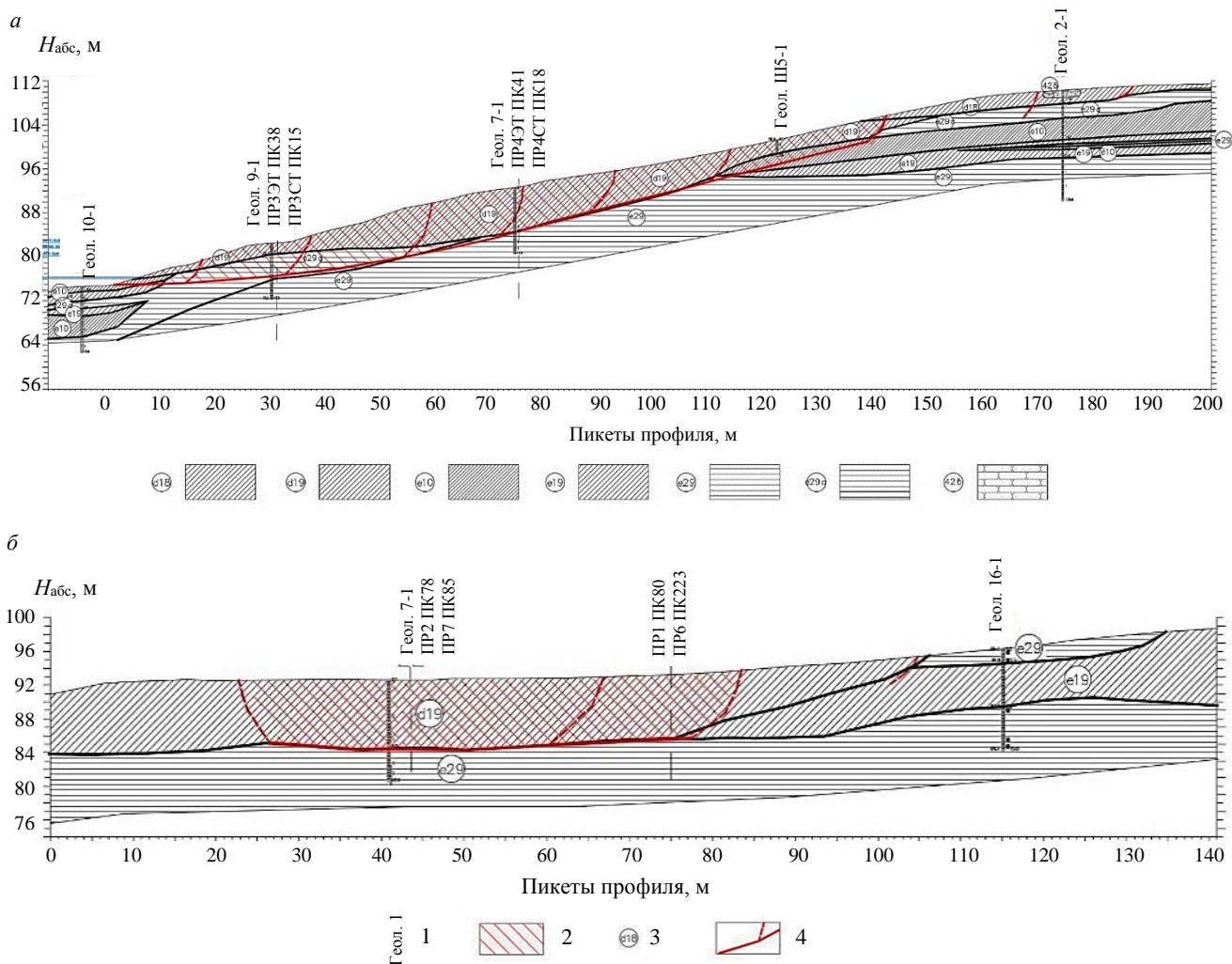


Рис.6. Геолого-геофизические разрезы по продольному III-III (а) и поперечному профилю ПР4 (б) [22, 26, с изменениями]

1 – номер скважины; 2 – механически разрушенные породы, слагающие оползневой массив;

3 – номер инженерно-геологического элемента; 4 – предполагаемые зоны поверхности скольжения и оползневые трещины

Таким образом, результаты комплексной геолого-геофизической интерпретации дают возможность внести в 3D-модель оползневой склона уточненное положение литологических границ, а также зоны ослабленных дезинтегрированных грунтов, относящихся к таким важным структурным элементам, как тело оползня и оползневые трещины. Внесение этих дополнительных данных в 3D-расчетную модель оползня позволяет в значительной степени уточнить его формируемую модель и получить более достоверные характеристики устойчивости склона [38-40].

Результаты расчета устойчивости склона на основании комплексных геолого-геофизических исследований. С учетом имеющейся информации о свойствах грунтов оползневой массива, полученных по данным инженерно-геологических изысканий, а также дополнительной – о структуре оползневой склона, извлеченной из материалов геофизических исследований, сформирована уточненная 3D-инженерно-геологическая модель оползневой склона. Информация об изменении физико-механических параметров грунтов в ослабленных зонах принималась на основании анализа имеющихся корреляционных зависимостей сейсмических свойств глинистых пород от их прочности, а также материалов электрической и сейсмической томографии совместно с результатами инженерно-геологических изысканий.

Внесение дополнительной геофизической информации в значительной степени повлияло на структуру поля напряженно-деформированного состояния оползневой массива, что изменило площадь, контуры и положение области массива, наиболее подверженной оползневому смещению («красная» зона). Эта область заметно увеличилась (см. рис.2, б), приведя к изменению величины



коэффициента устойчивости оползня, который уменьшился более чем в два раза. Согласно зональному распределению коэффициента устойчивости, в некоторых частях склона $K_{уст}$ достигает значений 1,16, что позволяет классифицировать склон по СП 420.1325800.2018 как условно-устойчивый.

Дополнительная геофизическая информация в 3D-модели оползневого склона внесла коррективы в определение расположения наиболее вероятных поверхностей скольжения и расчет устойчивости массива по этим поверхностям. В результате поиска наиболее вероятных сферических поверхностей скольжения программой Slide3 сформированы три поверхности, расположенные последовательно вдоль склона (см. рис.4, б). Значения коэффициентов устойчивости по этим поверхностям составили 1,17; 1,16; 1,60. При этом отдельные сферические поверхности скольжения располагаются с перекрытием около 20-25 м, что образует единое вытянутое по падению глетчерообразное оползневое тело. Значительное снижение $K_{уст}$ после внесения дополнительной геофизической информации обуславливается наличием большого количества ослабленных зон (оползневых трещин) в теле оползня. Особенно это заметно в его центральной части.

Расчет устойчивости склона в программе Slide2 методом Morgenштерна – Прайса также показал снижение коэффициента устойчивости склона после внесения дополнительной геофизической информации. На рис.3, б представлен результат расчета в программе Slide2 по профилю III-III. С учетом зон ослабленных грунтов и корректировки расположения литологических границ по данным геофизики значение $K_{уст}$ составило 1,18.

Результаты 2D-расчета по двум параллельным профилям II-II и III-III с учетом расположения зон ослабленных грунтов, приуроченных к основным элементам оползня, полученных по материалам геолого-геофизической интерпретации, были нанесены на поверхность 3D-модели (см. рис.4, б). Анализ 2D- и 3D-моделей с привлечением дополнительной геофизической информации показал подобие расположения поверхностей скольжения на склоне. При этом коэффициенты устойчивости имеют близкие значения.

Обсуждение. Результаты компьютерного 2D- и 3D-моделирования, выполненного с учетом данных СТ и ЭТ, позволили определить контур области грунтового массива, подверженного наибольшей оползневой опасности. Область вытянута вдоль склона и включает как зоны расположения наиболее вероятных поверхностей скольжения, так и оползневых трещин, в том числе и трещин различных оползневых циклов. Анализ глетчерообразной формы оползневой структуры показал, что оползневое смещение будет происходить не только вдоль, но и поперек склона. Внесение дополнительной геофизической информации позволило получить коэффициенты устойчивости, характерные для склонов и имеющие явные признаки оползневой активности. Отметим, что трещины отрыва в оползневом массиве, наиболее четко прослеживаемые на материалах ЭТ и СТ, соответствуют верхним частям сферических поверхностей скольжения.

Таким образом, данные 3D-моделирования оползня подтверждают целесообразность использования электро- и сейсмотомографических технологий для выделения локальных областей ослабленных грунтов, приуроченных к оползневым трещинам, и получения более точных оценок устойчивости оползневых склонов.

Выводы. Результаты 2D- и 3D-моделирования на основе инженерно-геологической информации позволяют получить близкие значения коэффициентов устойчивости оползневого склона. Однако объемная 3D-модель обладает несомненными преимуществами, так как дает более полное представление о пространственном распространении оползневого тела в пределах склона.

В отличие от 1D-способов изучения склона по данным бурения скважин, современные 2D-геофизические технологии предоставляют практически непрерывные разрезы оползневого склона, характеризующие детальное строение основных элементов оползня и областей ослабленных пород. Учет комплексной геофизической информации, полученной по продольным и поперечным профилям, при выполнении 3D-расчета устойчивости грунтовых масс позволяет получить наиболее полную картину возможного оползневого смещения.

Учет геофизической информации о размещении оползневых трещин отрыва и сдвига, окаймляющих тело оползня, при 3D-моделировании приводит к повышению достоверности оценки показателя устойчивости оползневого склона. В рассмотренном случае оползневой склон после



учета комплексной геофизической информации в расчетах модели из категории устойчивого был перекалиброван в условно-устойчивый.

Геофизическая информация о локальных ослабленных зонах существенно меняет представления о структуре поверхности скольжения оползня. На 3D-модели оползня, основанной только на инженерно-геологической информации, выделена одна поверхность скольжения, а с привлечением данных инженерной геофизики проявилась глетчерообразная оползневая структура. Выявленное более сложное строение оползня указывает на многофазное оползневое смещение, которое происходит не только по линии максимального уклона, но и поперек склона.

Таким образом, внесение в расчетную 3D-модель дополнительной геофизической информации о положении литологических границ и локализации зон ослабленных дезинтегрированных грунтов оползневой массы значительно повышает достоверность оценки устойчивости оползневой поверхности.

При проектировании строительных работ в пределах склона комплексная геолого-геофизическая 3D-модель оползневой поверхности обеспечивает выработку более обоснованных решений по обеспечению эксплуатационной надежности возводимых на нем сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sowers G.B., Sowers G.F. Introductory Soil Mechanics and Foundations. New York: Macmillan, 1970. 544 p.
2. Федоренко Е.В. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 6 (49). С. 24-26.
3. Cloutier C., Locat J., Couture R., Jaboyedoff M. The anatomy of an active slide: the Gascons rockslide, Québec, Canada // Landslides. 2016. Vol. 13. P. 241-258.
4. Tiwari B., Sassa K., Bobrowsky P.T., Takara K. Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk. Cham: Springer, 2021. Vol. 4. 644 p.
5. Павлович А.А., Кориунов В.А., Бажуков А.А., Мельников Н.Я. Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 502-509. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.502
6. Pospelov G., Goloborodko A. Landslides Within River Valleys in the Southern Part of the Pre-Caucasian Lowlands in Conditions of Intensive Development // Engineering and Mining Geophysics 2019 15th Conference and Exhibition, 22-26 April 2019, Gelendzhik, Russia. European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201901707
7. Поспехов Г.Б., Голобородько А.А. Инженерно-геологическое обеспечение защиты территории Павловского парка от оползневых процессов // Естественные и технические науки. 2018. № 1 (115). С. 70-73.
8. Stability of Slopes and Underground Excavations: Proceedings of Indian Geotechnical Conference 2020. Singapore: Springer, 2022. Vol. 3. 372 p. DOI: 10.1007/978-981-16-5601-9
9. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Васильева А.Д. Обоснование устойчивости внешних отвалов Кузбасса и мониторинг их состояния // Горный информационно-аналитический бюллетень. № 4. С. 109-120. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-109-120
10. Ponomarenko M.R., Kutepov Y.I. Mining Complexity Assessment to Substantiate Deformation Monitoring at Open Pit Mines // Journal of Mining Science. 2021. Vol. 57. P. 986-994. DOI: 10.1134/S1062739121060119
11. Кутепова Н.А., Кутепов Ю.И., Кудашов Е.С., Данильев С.М. Изучение прочности фосфогипса с примесями нефелинового шлама в конструкциях ограждающих дамб гипсонакопителей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 10. С. 67-78. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-67-78
12. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Васильева А.Д., Мухина А.С. Инженерно-геологические и экологические проблемы при эксплуатации и рекультивации высоких отвалов на разрезах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 8. С. 164-178. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-8-0-164
13. Slide3 – 3D Limit Equilibrium Slope Stability Overview: Help to the Rocscience Slide 3. URL: <https://www.rocscience.com/help/slide3/tutorials> (дата обращения 12.04.2022).
14. Фоменко И.К., Зеркаль О.В., Горбцов Д.Н. Современные средства в количественной оценке устойчивости склонов // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения: Материалы докладов научно-практической конференции, 13-14 апреля 2017, Москва, Россия. М.: Геомаркетинг, 2017. С. 94-101.
15. Kaya A., Ümit M. Midilli Slope stability evaluation and monitoring of a landslide: a case study from NE Turkey // Journal of Mountain Science. 2020. Vol. 17. P. 2624-2635. DOI: 10.1007/s11629-020-6306-x
16. Cody E., Draebing D., McColl S. et al. Geomorphology and geological controls of an active paraglacial rockslide in the New Zealand Southern Alps // Landslides. 2020. Vol. 17. P. 755-776. DOI: 10.1007/s10346-019-01316-2
17. Daniliev S.M., Danilieva N.A. Perspective Electrical Exploration the Dams of Gypsum Accumulator in the Framework for Geotechnical Monitoring // Engineering and Mining Geophysics 2019 15th Conference and Exhibition, 22-26 April 2019, Gelendzhik, Russia. European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201901716
18. Бурлуцкий С.Б., Танинкова В.С., Глазунов В.В. Уточнение оценки устойчивости оползневой поверхности с использованием материалов геофизических исследований // Инженерные изыскания. 2020. № 3. С. 58-67. DOI: 10.25296/1997-8650-2020-14-3-58-67
19. Boumekeur N., Benzaid R., Atoub S. Geological, Hydrological and Geotechnical Impact for the Landslides Susceptibility in Mila Basin (Northeast Algeria) // Research Developments in Geotechnics, Geo-Informatics and Remote Sensing: Proceedings of the 2nd Springer Conference of the Arabiane Journal of Geosciences (CAJG-2), 25-28 November 2019, Sousse, Tunisia. Springer, 2022. P. 11-15. DOI: 10.1007/978-3-030-72896-0



20. Sassa K., Nagai O., Solidum R. et al. An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide // *Landslides*. 2010. Vol. 7. P. 219-236. DOI: 10.1007/s10346-010-0230-z
21. *Landslide Science and Practice* / Ed. by C.Margottini, P.Canuti, K.Sassa. Vol. 5: Complex Environment, Springer, 2013. 354 p.
22. Бурлуцкий С.Б. Физико-геологические модели оползневых склонов по данным электро- и сейсмотомографии: Автореферат дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2015. 22 с.
23. Gallotti G., Tinti S. A New Approach for Landslide Modeling: Application to the Scilla 1783 Tsunamigenic Landslide, South Italy // *Pure and Applied Geophysics*. 2020. Vol. 177. P. 3563-3576. DOI: 10.1007/s00024-020-02546-5
24. Liang Wang, Xue Zhang, Filippo Zanibon et al. Mathematical Optimization Problems for Particle Finite Element Analysis Applied to 2D Landslide Modeling // *Mathematical Geosciences*. 2021. Vol. 53. P. 81-103. DOI: 10.1007/s11004-019-09837-1
25. Bar N., McQuillan A. 3D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis for Anisotropic and Faulted Rock Masses in Australian Coal and Iron Ore Mines // 10th Asian Rock Mechanics Symposium, 29 October – 3 November 2018, Singapore. OnePetro, 2018. № ISRM-ARMS10-2018-127.
26. Бурлуцкий С.Б., Глазунов В.В. Особенности выделения структурных элементов оползня с помощью двумерной сейсмо-геоэлектрической модели, синтезированной по данным электро- и сейсмотомографических исследований // *Инженерные изыскания*. 2017. № 6-7. С. 94-107. DOI: 10.3997/2214-4609.201700410
27. Mandal S., Mondal S. Geoinformatics and Modelling of Landslide Susceptibility and Risk. An RS & GIS-based Model Building Approach in the Eastern Himalaya. Cham: Springer, 2019. 223 p. DOI: 10.1007/978-3-030-10495-5
28. Shuvalova R.A., Burlutsky S.B., Glazunov V.V., Zhdanov S.V. Landslide Slope Stability Estimation by The Geotechnical and Geophysical Datam // *Engineering and Mining Geophysics* 2021, 26-30 April 2021, Gelendzhik, Russia. European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. DOI: 10.3997/2214-4609.202152022
29. Shu-wei Sun, Bo Pang, Jia-bing Hu et al. Characteristics and mechanism of a landslide at Anqian iron mine, China // *Landslides*. 2021. Vol. 18. P. 2593-2607. DOI: 10.1007/s10346-021-01671-z
30. Slide2 User Guide Rocscience Inc., Toronto. URL: <https://www.rocscience.com/help/slide2/tutorials> (дата обращения 22.04.2022).
31. Göktepe F., Keskin I. A Comparison Study between Traditional and Finite Element Methods for Slope Stability Evaluations // *Journal of the Geological Society of India*. 2018. Vol. 91. P. 373-379. DOI: 10.1007/s12594-018-0864-3
32. Izotova V., Petrov D., Pankratova K., Pospheov G. Research of Acoustic Characteristics and Physical and Mechanical Properties of Quaternary Soils // *Engineering and Mining Geophysics* 2020 16th Conference and Exhibition, 14-18 September 2020, Perm, Russia. European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. DOI: 10.3997/2214-4609.202051130
33. Hussain G., Singh Y., Bhat G.M. et al. Geotechnical Characterisation and Finite Element Analysis of Two Landslides along the National Highway 1-A (Ladakh Region, Jammu and Kashmir) // *Journal of the Geological Society of India*. 2019. Vol. 94. P. 93-99. DOI: 10.1007/s12594-019-1272-z
34. Burlutskiy S., Glazounov V. Separation of the Structural Elements of the Landslide Based on Seismic-Geoelectric Model of Landslide Slopes // 13th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2017, 24-28 April 2017, Kislovodsk, Russia. European Association of Geoscientists & Engineers, 2017. DOI: 10.3997/2214-4609.201700410
35. Fan X., Yang F., Siva Subramanian S. et al. Prediction of a multi-hazard chain by an integrated numerical simulation approach: the Baige landslide, Jinsha River, China // *Landslides*. 2020. Vol. 17. P. 147-164. DOI: 10.1007/s10346-019-01313-5
36. Boualla O., Mehdi K., Fadili A. et al. GIS-based landslide susceptibility mapping in the Safi region, West Morocco // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2017. Vol. 78 (4). DOI: 10.1007/s10064-017-1217-y
37. Kumar N., Verma A.K., Sardana S. et al. Comparative analysis of limit equilibrium and numerical methods for prediction of a landslide // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2018. Vol. 77. P. 595-608. DOI: 10.1007/s10064-017-1183-4
38. Brideau M.-A., McDougall S., Stead D. et al. Three-dimensional distinct element modelling and dynamic runout analysis of a landslide in gneissic rock, British Columbia, Canada // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2012. Vol. 71. P. 467-486. DOI: 10.1007/s10064-012-0417-8
39. Reyes-Carmona C., Galve J.P., Moreno-Sánchez M. et al. Rapid characterisation of the extremely large landslide threatening the Rules Reservoir (Southern Spain) // *Landslides*. 2021. Vol. 18. P. 3781-3798. DOI: 10.1007/s10346-021-01728-z
40. Graber A., Santi P., Meza Arestegui P. Constraining the critical groundwater conditions for initiation of large, irrigation-induced landslides, Sigvas River Valley, Peru // *Landslides*. 2021. Vol. 18. P. 3753-3767. DOI: 10.1007/s10346-021-01767-6

Авторы: В.В.Глазунов, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-5816-0507> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), С.Б.Бурлуцкий, канд. геол.-минерал. наук, доцент, s.burlutsky@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0894-2380> (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия), Р.А.Шувалова, инженер-геолог II категории, <https://orcid.org/0000-0002-4122-4946> (ООО «Промтерра», Москва, Россия), С.В.Жданов, канд. геол.-минерал. наук, главный специалист, <https://orcid.org/0000-0002-8286-8799> (АО «Полиметалл Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.