

УДК 550.83

DOI: 10.46698/VNC.2024.91.39.007

Оригинальная статья

Применение геофизических методов при изучении оползневых процессов

И.А. Керимов , А.С. Эльжаев 

Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный,
пр. Х. Исаева, 100, e-mail: aslambek.elzhaev@mail.ru

Статья поступила: 30.09.2024, доработана: 11.11.2024, принята к публикации: 15.11.2024

Резюме: Актуальность работы. С ростом социально-экономических преобразований в современном обществе во всем мире наблюдается активное освоение территорий под строительство объектов различных видов инфраструктуры (социальной, транспортной, производственной, туристической), зачастую влекущее за собой экзогенные процессы. Такие процессы требуют все большего внимания к исследованию, т.к. негативно сказываются на экосистемах и безопасности населения. **Объектом исследования** в данной статье являются оползни. Оползневые процессы наносят значительный ущерб как хозяйственной деятельности человека, так и его здоровью. Обычно применяемые для изучения оползневых явлений и их прогноза прямые (разрушающие) методы (бурение скважин, сооружение горных выработок) сопряжены с большими затратами средств и времени. **Методы исследования.** В последние годы для изучения оползневых процессов широко применяются геофизические методы, позволяющие с высокой точностью выделять ослабленные зоны (трещиноватые, обводненные), определять глубину поверхности скольжения и положение кровли и подошвы пород повышенной влажности, наблюдать за изменениями физических свойств, выявлять зоны разуплотнения грунтов и др. Наибольшее применение среди всего множества методов инженерной геофизики нашли методы электроразведки и сейсморазведки (в различных их модификациях), которые при их комплексировании дают лучшие результаты. Необходимо отметить экономическую целесообразность их проведения, выраженную в снижении времени и стоимости всего комплекса инженерно-геофизических изысканий. **Результаты.** В статье представлены результаты геофизических исследований при изучении оползневых процессов. **Выводы.** Практическая значимость данной статьи заключается в том, что проведен обзор практик и примеров применения геофизических методов для решения связанных с оползнями проблем, как на территории РФ, так и за ее пределами.

Ключевые слова: геофизические методы, оползень, опасные геологические процессы, электроразведка, сейсморазведка, физические свойства, классификация, прогнозирование.

Благодарности: Работа выполнена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (Соглашение Минобрнауки РФ № 075-15-2024-644).

Для цитирования: Керимов И.А., Эльжаев А.С. Применение геофизических методов при изучении оползневых процессов. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 66-83. DOI: 10.46698/VNC.2024.91.39.007

DOI: 10.46698/VNC.2024.91.39.007

Original paper

Application of geophysical methods in the study of landslide processes

I.A. Kerimov , A.S. Elzhaev 

Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 Kh. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russian Federation,
e-mail: aslambek.elzhaev@mail.ru

Received: 30.09.2024, revised: 11.11.2024, accepted: 15.11.2024

Abstract: Relevance. With the growth of socio-economic transformations in modern society around the world, there is an active development of territories for the construction of various types of infrastructure (social, transport, industrial, tourism), often entailing exogenous processes. Such processes require more and more attention to research, because negatively affect ecosystems and public safety. **The object of study** in this article is landslides. Landslide processes cause significant damage to both human economic activity and human health. Direct (destructive) methods (drilling wells, constructing mine workings) that are usually used to study landslide phenomena and their prediction are associated with large expenditures of money and time. **Research methods.** In recent years, geophysical methods have been widely used to study landslide processes, making it possible to accurately identify weakened zones (fractured, waterlogged), determine the depth of the sliding surface and the position of the roof and base of rocks with high humidity, observe changes in physical properties, identify zones of soil decompression, etc. Among various methods of engineering geophysics, the most widely used are the methods of electrical prospecting and seismic prospecting (in their various modifications), which, when combined, give the best results. It is necessary to note the economic feasibility of their implementation, expressed in reducing the time and cost of the entire complex of engineering and geophysical surveys. **Results.** The article presents the results of geophysical research in the study of landslide processes. **Conclusions.** The practical significance of this article lies in the fact that a review of practices and examples of the successful use of geophysical methods to solve landslide-related problems both in the Russian Federation and abroad was carried out.

Keywords: geophysical methods, landslide, hazardous geological processes, electrical prospecting, seismic prospecting, physical properties, classification, forecasting.

Acknowledgments: *The work was carried out within the framework of a large scientific project “Dynamics of the geoecological state of the mountain river basins of the North-East Caucasus, Azerbaijan and Iran in the context of climate change and increasing anthropogenic load” (Agreement of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-15-2024-644).*

For citation: Kerimov I.A., Elzhaev A.S. Application of geophysical methods in the study of landslide processes. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 66-83. DOI: 10.46698/VNC.2024.91.39.007

Введение

В настоящее время в мире наблюдается рост мероприятий, нацеленных на устойчивое развитие территорий, т.е. всё чаще предпринимаются меры обеспечения безопасности и благоприятных условий для общества, в том числе меры, ограничивающие влияние негативных факторов человеческой деятельности (хозяйственной и др.) на окружающую среду. Но не только человеческая деятельность воздействует на окружающую среду. Последняя подвержена воздействию природных процессов,

которые зачастую носят стихийный, катастрофический характер. Одним из таких опасных природных процессов являются оползни. Известно много случаев, когда оползни нанесли значительный ущерб не только инфраструктуре, но и здоровью и жизни человека. В работе [Vorobyov et al., 2022] авторы приводят информацию о том, что по причине оползней ежегодно погибает около 1000 человек и причиняются убытки в размере 4 миллиардов долларов.

Оползни относятся к числу наиболее опасных геологических процессов и, как отмечалось выше, представляют угрозу не только инженерным сооружениям, но и могут повлечь за собой значительные человеческие жертвы. Оползни могут возникать по бортам карьеров, при разработке полезных ископаемых открытым способом. С оползневыми явлениями приходится сталкиваться довольно часто по берегам рек, озер, морей, а также в горной местности [Бурлуцкий, Кудашов, 2018].

В свете вышесказанного становятся очевидными актуальность описываемой проблемы и важность изучения оползневого явления и его прогнозирования.

Характеристика, строение и классификации оползней

Для понимания закономерностей оползневых процессов, а также для их прогнозирования и контроля протекания необходимо знать строение изучаемого объекта (оползня) и иметь достаточное представление о характеристиках и классификациях оползней.

Оползнем называют смещение грунтов, а также горных пород скользящего характера. Скольжение происходит по склонам гор, крутых берегов или оврагов. Оползень может быть вызван рядом причин, основными из которых считаются выпадение большого количества осадков, подмыв или чрезмерное увлажнение склонов, землетрясение, а также антропогенный фактор.

Оползень представляет собой массу горных пород, сползшую или сползающую вниз по склону или откосу. Образование оползня – это геологический экзогенный процесс, проявляющийся в смещении масс горных пород вследствие нарушения их устойчивости, под влиянием силы тяжести, когда касательные напряжения становятся больше сопротивления сдвигу. Оползнем также называют участок смещенных горных пород, включая зоны отрыва, транзита и накопления [Бурлуцкий, Кудашов, 2018].

В работе [Керимов и др., 2024] предложены с позиций системного подхода следующие определения оползня и оползневого процесса:

Оползень – природное тело (динамическая геосистема открытого типа), включающее горные породы и почвенно-растительный покров, ограниченное земной поверхностью и поверхностью смещения.

Оползневой процесс – последовательное изменение состава, состояния и свойств оползня с момента его зарождения и перемещения на другой уровень по поверхности скольжения, как правило, без потери контакта с неподвижным ложем.

Оползневой процесс может возникнуть под воздействием сил, оказывающих даже незначительное влияние на устойчивость грунтовых масс, слагающих оползневой склон. Даже незначительные побудительные причины, такие как обводнение грунта в результате дождей или сотрясение грунта от проезжающей автотехники могут вызвать процесс движения оползневых масс. Вследствие этого происходят изменения в структуре грунта и его состоянии, способствующие началу процесса потери его устойчивости. Оползень может формироваться на протяжении длитель-

ного периода времени. Иногда процесс потери устойчивости незаметен, иногда затихает и прекращается вообще, но это не значит, что под воздействием каких-либо природных или техногенных факторов он не будет возобновлен и не приведет к катастрофическим последствиям [Бурлуцкий, Кудашов, 2018].

На сегодняшний день существует много классификаций оползней, в основу которых положены такие параметры, как строение оползня, его размер, динамика оползневого процесса, причина и условия образования и др. [Саваренский, 1935; Бурлуцкий, Кудашов, 2018; Емельянова, 1972; Кюнтцель, 1980; Петров, 1988].

Отдельные классификации представляют наибольший интерес.

Поповым И.В. была предложена классификация оползней по возрасту, из которой можно сделать вывод, что для молодых и древних оползней характерен разный базис оползания [Попов, 1952]. Выделяют оползни современные и древние.

Современные оползни подразделяются на: движущиеся или активные (процесс равновесия продолжается), приостановившиеся (действие силы, вызывающей нарушение равновесия, временно уравновешено факторами устойчивости), остановившиеся (силы, нарушающие равновесие, временно устранились), закончившиеся (действие нарушающей равновесие силы исчерпано). Древние оползни, не отвечающие современному положению базиса эрозии и уровню абразии, по состоянию равновесия масс горных пород делятся на открытые и погребенные [Ежов, Хорошилов, 2022].

Другой вариант классификации заключается в разделении оползней по характеру движения на деляпсивные (образование оползней происходит на сравнительно ровной поверхности путем скольжения массы пород под действием своего веса и базис оползания находится на уровне или выше подошвы) и детрузивные (возможность образования более крупных оползневых тел, возникающих, как правило, в верхней части склона, базис оползания находится ниже уровня лежащих впереди пород, выталкивающихся при оползании) [Павлов, 1903].

По происхождению выделяют следующие генетические типы оползней: сейсмогенные, гидрогенные, климатогенные, гидрогеологенные и полигенные.

Во многих работах можно найти и другие типы оползней с учетом различных характеристик. Например, Тихвинский И.О. предлагает следующую классификацию: оползни сдвига (скольжения, блоковые, «собственно оползни»), выдавливания (раздавливания), гидродинамического разрушения (выплывания), вязкопластические (вязкопластического течения, консистентные, грязевые), внезапного разжижения [Тихвинский, 1988]. Петровым Н.Ф. выделяются оползни скольжения, выдавливания, проседания, выплывания (суффозионные), течения, оседания и разжижения [Петров, 1988].

Для развития оползневого процесса необходимы факторы и причины. Причины оползневого процесса можно разделить на три группы [Пендин, Фоменко, 2015]:

1. Изменение высоты и формы склона. В эту группу входит срезание склона посредством природной или антропогенной деятельности. В качестве природной деятельности выступает эрозия склона постоянными или временными водотоками, абразивным воздействием водохранилищ и морей. Для антропогенной деятельности характерен искусственный срез склона для инженерно-хозяйственных нужд.

2. Изменение строения, состояния и свойств грунтов, из которых состоит склон. В данную группу объединены процессы, изменяющие свойства грунтов (физические, химические, механические). В частности, физическое и химическое выветри-

вание, воздействие атмосферных осадков и подземных вод, изменяющее влажность грунтов, а также суффозионный и карстовый процессы.

3. Дополнительная нагрузка на склон. К ней относятся сейсмические, гидростатические, гидродинамические, а также антропогенные статическое или динамическое воздействия.

Исходя из этого, оползневой процесс формируется в геологической среде, подготавливается группой факторов и происходит под действием силы тяжести. В качестве признаков, идентифицирующих проявления оползневого процесса, наиболее часто используются следующие: оползневые трещины и цирки; плоскости срыва; образующиеся валы у подножия склона; оползневые уступы; несовпадение положения пластов в разрезе склонов; наличие большого числа водопоявлений на склонах; наличие деформаций в сооружениях, находящихся в области влияния оползневого процесса. Данные признаки имеют разный уровень выраженности в зависимости от активности оползня, стадии его развития и возраста [Ежов, Хорошилов, 2022].

Важным этапом в изучении оползневых процессов является их прогнозирование, т.к. учет вероятного их появления, прогнозных данных о степени активности и продолжительности позволит не только правильно планировать объекты инфраструктуры, проводить защитные мероприятия, но и, что наиболее важно, избегать человеческих жертв.

При инженерно-геологических исследованиях принято разделение прогнозов на глобальные, региональные и локальные, так как в зависимости от того, какой объем геологического пространства вовлекается в сферу прогнозирования, существенно меняется не только вид прогноза, но и задачи и применяемые методы прогнозирования [Шуляков, 2010].

Для проведения оценки оползневой опасности требуется решение ряда вопросов относительно строения склона, условий залегания отдельных слоев и толщ горных пород, состояния и свойств коренных и перекрывающих их более молодых пород, режима подземных вод. Эти вопросы необходимо решить с учетом таких факторов как климат и гидрогеологические условия, история развития оползня, инженерная деятельность человека.

К традиционным методам оценки оползневой опасности относятся инженерно-геологические методы. Каждый оползень имеет определенную подвижность, которая зависит от состояния равновесия слагающих его пород и проявляется в рельефе оползневого участка, в изменении его внутреннего строения и нарушении устойчивости местности и сооружений. Таким образом, инженерно-геологические методы оценки оползневой опасности основываются на изучении морфологии, строения (структуры оползня), обводнённости и физико-механических свойств пород, слагающих оползень, сопутствующих геологических процессов и явлений, динамики развития оползневых явлений, соотношения усилий (сдвигающих и удерживающих), определяющих равновесие масс горных пород, слагающих оползень [Бурлуцкий, Кудашов, 2018].

Для повышения детальности и эффективности инженерно-геологических исследований оползней необходимо привлечение методов, позволяющих оперативно охарактеризовать неоднородную структуру оползневых массивов, осуществить оценку изменения в них физико-механических свойств пород, а также выделить зоны ослабления, приуроченные к основным элементам оползня. Большинство

этих задач может быть решено с привлечением инженерно-геофизических методов исследования [Воронков и др., 2008; Ескин и др., 2016; Заалишвили, Голик, 2024; Караблин, Простов, 2020; Anterrieu et al., 2010; Power et al., 2018].

Обзор геофизических методов, применяемых для изучения оползневых процессов

Дополнительные возможности для всестороннего и более детального изучения оползневых структур, выделения ослабленных (за счет изменения физических свойств) зон и оценки устойчивости массивов горных пород дают геофизические методы.

Применение геофизических методов позволяет обследовать большие площади при детальности наблюдений, недоступной для методов инженерно-геологических изысканий. Поэтому в последние годы для решения указанных задач инженерно-геофизические изыскания получили широкое распространение [Заалишвили, Голик, 2024; Караблин, Простов, 2020; Керимов и др., 2023; Nauck, Kneisel, 2008; Zakaria et al., 2022].

Одно из основных преимуществ методов инженерной геофизики перед другими полевыми методами исследования оползневых процессов заключается в том, что они позволяют изучать физико-механические свойства пород оползневого массива во времени и пространстве, не нарушая целостности объекта исследования.

Наибольшую эффективность при решении инженерно-геологических задач в целом и, в частности, при изучении оползней показали различные методы сейсморазведки [Керимов и др., 2023; Ескин и др., 2016; Sloan et al., 2015; Yang et al., 2023] и электроразведки [Саламов и др., 2010; Чаплыгин, 2021; Power et al., 2018; Sjö Dahl et al., 2005]. Этими методами решаются следующие задачи:

1. Картирование массива оползня (с литологическими и гидрогеологическими особенностями).
2. Определение мощностей и электрических свойств отдельных слоев.
3. Определение глубины залегания подстилающих пород.
4. Изучение ослабленных участков массива и установление поверхности скольжения.
5. Определение поверхностей древних оползней.
6. Определение направления и скорости движения оползня.
7. Установление направления и скорости движения подземных вод.
8. Оценка водно-физических и физико-механических свойств грунтов, степени обводненности пород в естественном залегании.

Ниже приведем обзор применения разных геофизических методов для исследования оползневых процессов на конкретных примерах (по материалам работ [Ескин и др., 2016; Саламов и др., 2010; Чаплыгин, 2021; Давыдов и др., 2018; Воронков и др., 2008; Караблин, Простов, 2020; Оленченко, Кондратьев, 2017]).

1. Определение глубины залегания зеркала скольжения оползня в районе поселка Харанцы на острове Ольхон. Остров Ольхон является одним из самых крупных озерных островов мира, находится на озере Байкал. Оползни в большинстве случаев встречаются в западной части острова, более подверженной нагрузке из-за активного освоения береговой линии для туризма и отдыха.

На данном участке нашли применение методы: вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ). Для

определения глубины залегания зеркала скольжения в качестве объекта исследования была выбрана часть оползня в районе поселка Харанцы на острове Ольхон.

ВЭЗ были выполнены четырехэлектродной симметричной установкой АМNB. Всего было выполнено 15 зондирований по трем профилям. В этих же точках была выполнена сейсморазведка. Наблюдения проводились с возможностью регистрации продольных и поперечных волн. Такая методика измерений позволяет получать средние значения скоростей в верхней зоне разреза до глубины 10–20 м.

По результатам совместной интерпретации (ВЭЗ и МПВ) построен сводный геофизический разрез. Пример разреза по профилю ПР2 представлен на рис. 1.

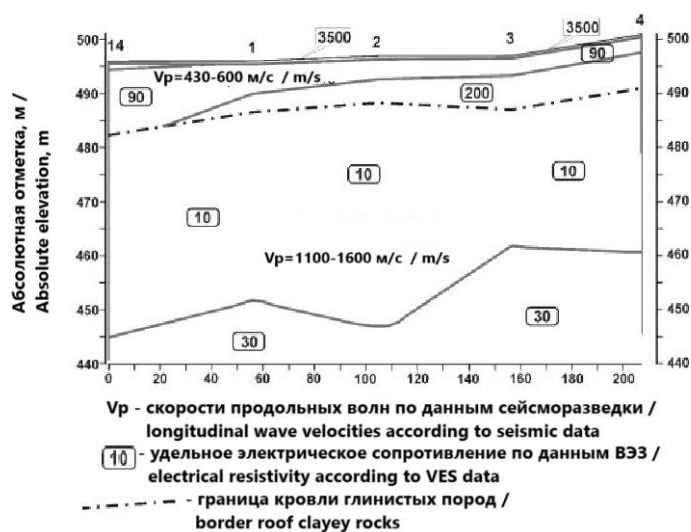


Рис. 1. Сводный геофизический разрез по профилю ПР2. Остров Ольхон, поселок Харанцы [Ескин и др., 2016] /

Fig. 1. Summary geophysical section along profile PR2. Olkhon Island, Kharantsy village [Eskin et al., 2016]

По данным сейсморазведки в верхней части разреза выделяется только два горизонта: первый, представленный суглинками и супесями, и второй, сложенный глинистыми породами. Скорость продольных волн V_p в первом составляет 430–600 м/с, а во втором – 1100–1600 м/с. Различие в скоростях определяется типом грунта, а также процентным содержанием воды. Мощность верхнего слоя на протяжении всего профиля колеблется в пределах 6–9 м. Подошву глинистых пород определить по годографам не представлялось возможным, поэтому она определена по данным электроразведки.

В результате количественной интерпретации кривых ВЭЗ в пределах профиля выделяется четыре основных горизонта. Самый верхний слой имеет высокое сопротивление (3500 Ом·м) и мощность 0,5–1 м. Ниже расположен горизонт, представленный суглинками и супесями с сопротивлением 90 Ом·м. Его мощность варьирует от 3 м в районе пикета ПК4 до 12 м на пикете ПК14. Под ним находится выклинивающийся слой, сложенный обводненными песками с электрическим сопротивлением 200 Ом·м, средняя мощность которого составляет 5–6 м. Выклинивание происходит по направлению предполагаемой линии движения оползня. Мощность следующего горизонта составляет 30–40 м на ПК4 и ПК14 соответственно. То есть по направлению движения оползня мощность данного слоя, сложенного глинистыми породами,

возрастает. Он характеризуется низким электрическим сопротивлением – 10 Ом·м. Под ним на глубине 40-50 м расположен слой с электрическим сопротивлением 30 Ом·м. Данный горизонт сложен разрушенными, обводненными коренными породами. Его кровля является зеркалом скольжения оползня [Ескин и др., 2016].

2. Прогноз оползня на склоне горы Боздаг. Участок исследования находится на территории Азербайджана в районе Мингечаурского водохранилища. Исследование динамики развития оползневых процессов в данном районе является весьма актуальным, т.к. Мингечаурское водохранилище играет значительную роль в экономике страны.

Задачи, для решения которых были привлечены методы электроразведки (ВЭЗ, ЭП и ЕП), заключались в следующем:

1. Литологическое расчленение разреза;
2. Выявление разрывных нарушений и определение глубины залегания плоскости скольжения оползней;
3. Определение физических свойств грунтов, слагающих исследуемый участок;
4. Прогнозирование оползней и выдача рекомендаций защитных мер.

Полевые работы проводились в два этапа. На первом этапе по всей площади исследования вышеназванными методами проводились по шести профилям. В результате был выявлен предполагаемый участок активизации оползневого процесса. На втором этапе на оползнеопасном участке был налажен геофизический мониторинг и в течение трех лет каждый месяц методами ВЭЗ, ЭП и ЕП проводились измерения по профилям. Метод ВЭЗ применялся с целью литологического расчленения геологического разреза до глубины 40 м, выявления глубины залегания плоскости скольжения и мощности оползневого тела, определения наличия разрывных нарушений, определения предполагаемых физических свойств грунтов. Методом ЭП в двух глубинах изучалось кажущееся электрическое сопротивление грунтов и уточнялось местоположение, направление и падение разрывных нарушений. Метод ЕП на площади исследований применялся для того, чтобы определить направление интеграции инфильтрационных вод, образовавшихся в результате атмосферных осадков и поступающих в геологическую среду по трещинам.

В результате проведения электроразведки в районе исследований впервые была с детальностью высокой точности расчленена литология до глубины 40 м. Кроме того, были выявлены и прослежены разрывные нарушения, в том числе и ранее неизвестные (носящие разнонаправленный характер), а также определены направления движения подземных вод и физические свойства грунтов. Выявленные разнонаправленные разрывные нарушения были (на момент проведения исследований) расценены как бровки будущих оползней, что позже нашло подтверждение [Саламов и др., 2010].

3. Выявление поверхности скольжения оползня в районах трасс магистральных трубопроводов. Для изучения и мониторинга опасных геологических процессов на трассах магистральных трубопроводов, с целью прогноза и предотвращения данных явлений, требуется применение геофизических методов, поскольку бурение скважин на откосах при традиционных методах инженерно-геологических изысканий зачастую невозможно. Геофизические методы позволяют обследовать большой объем площадей с высокой точностью и детальностью наблюдений.

Для оползней характерно разнообразие разноориентированных границ раздела с градиентным изменением физических свойств. Таким образом, физико-геологи-

ческая модель оползневого массива может стать основой для расчета устойчивости откосов. Особенность модели заключается в наличии поверхности скольжения, где естественная структура претерпевает наибольшие изменения.

Одной из ключевых задач является выявление поверхности скольжения оползня: определение её положения, выявления характера её формирования и развития в разрезе. Поскольку поверхности скольжения в верхней части разреза связаны с высокопластичными глинистыми породами, для её выявления и прослеживания наибольшими возможностями обладают методы электроразведки.

С помощью электроразведки определяют положение кровли и подошвы пластичных пород, что позволяет определить вероятность возникновения оползней выдавливания. Однако для изучения гидрогеологической обстановки на участке требуется использовать комплекс методов электроразведки. Таким образом, дополнительно определяются региональные водоносные горизонты и водоупоры.

Для изучения динамики оползневых процессов требуется длительное наблюдение за изменением таких параметров как удельные сопротивления, потенциалы и градиенты потенциалов. Информация о данных параметрах позволит нам спрогнозировать перемещение тела оползня.

Один из примеров такого мониторинга при оценке оползневых явлений представлен на рис. 2.

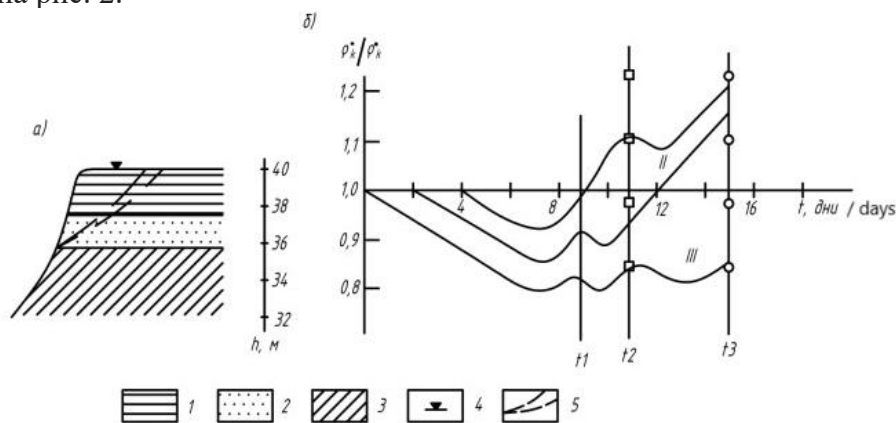


Рис. 2. Режимные наблюдения на оползневом откосе карьера:

a – модель склона; *б* – результаты наблюдений для разносов $AB=2,5$ м, $AB=4,5$ м, $AB=25$ м.

Условные обозначения: 1 – глины, 2 – пески, 3 – сланцы, 4 – точка ВЭЗ, 5 – зона скольжения /

Fig. 2. Routine observations on the nuthatch slope of the quarry: *a* – slope model; *b* – observation results for spacing $AB = 2.5$ m, $AB=4.5$ m, $AB=25$ m. Conventional: 1 – clays, 2 – sands, 3 – shales, 4 – VES point, 5 – slip zone

В данном случае был подрезан откос, в результате чего возник оползень объемом около 10 тыс. м³. Мониторинг проводился методом сопротивлений, для измерения кажущихся сопротивлений использовалась симметричная четырехэлектродная установка.

Были получены графики функций $\rho_k = f(t)$ для трех разносов (глубин). Из данных наблюдений можно выявить, что величины удельного сопротивления изменяются за несколько суток до начального смещения пород.

Отсюда можно сделать вывод, что изменения в структуре начинаются на глубине и развиваются снизу вверх в несколько стадий. Было установлено, что формирование поверхности скольжения в данном случае по скорости составило от 0,2 до 2,2 м/ч [Чаплыгин, 2021].

4. Изучение закрытого карста в г. Кунгур. Одним из опасных геологических процессов является образование карстов, которые достаточно широко распространены на территории Пермского края. Известны случаи возникновения по вине карста оползней и провалов, когда под землю уходили целые селения, мелели озера и изменялись течения рек.

При исследовании всех форм карста (открытые, закрытые) большой популярностью пользуются геофизические методы исследований, являющиеся наиболее оперативными и достаточно информативными.

Геофизические исследования проводились во дворе дома, на котором замечено появление трещин, для уточнения безопасности его дальнейшей эксплуатации. Основной задачей ставилось определение участков, подверженных процессу карстообразования, в непосредственной близости от дома. В состав работ входила комплексная малоглубинная сейсморазведка (МПВ + MASW) и электроразведка методом ВЭЗ. Сейсмический профиль проходил вдоль юго-западной стены, в 3 м от дома. Провести измерения ВЭЗ вблизи дома было невозможно из-за экранирующего влияния стальных канализационных труб, уложенных рядом, поэтому точки зондирования выбирались со смещением. Наличие асфальтированных дорожек и бетонных площадок привело к ограничению некоторых разносов ВЭЗ. Результаты геофизических работ, оформленные в виде сейсмических разрезов и колонок ВЭЗ, представлены на рис. 3.

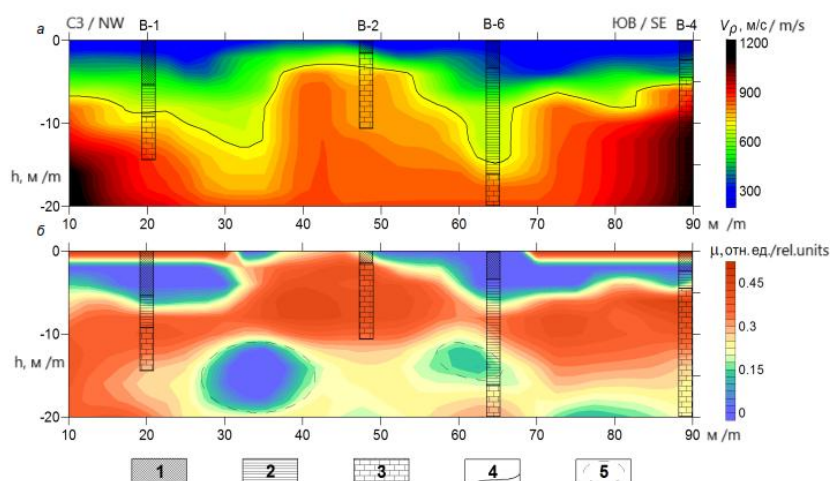


Рис. 3. Результаты геофизических работ на карстоопасном участке (г. Кунгур). а – скоростной сейсмический разрез продольных волн; б – разрез коэффициента Пуассона.

1 – насыпной грунт суглинистого состава ($\rho = 23\text{-}44 \text{ Ом}\cdot\text{м}$);

2 – глина элювиальная ($\rho = 10\text{-}17 \text{ Ом}\cdot\text{м}$); 3 – подстилающие породы ($\rho = 280\text{-}2000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$);

4 – ориентировочное положение кровли карстующихся пород по сейсмическим данным;

5 – зоны предполагаемого развития карста /

Fig. 3. Results of geophysical work in a karst-hazardous area (Kungur mountain).

a – high-speed seismic longitudinal wave section; b – Poisson's ratio section.

1 – bulk soil of loamy composition ($\rho = 23\text{-}44 \text{ Ом}\cdot\text{м}$); 2 – clay eluvial ($\rho = 10\text{-}17 \text{ Ом}\cdot\text{м}$);

3 – underlying rocks ($\rho = 280\text{-}2000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$); 4 – approximate position of the roof

of karst rocks according to seismic data; 5 – zones of proposed karst development

По изменению сейсмических скоростей и коэффициента Пуассона μ удалось проследить три основных структурных элемента разреза. Верхний слой (от 2 до 10 м) относится к рыхлым терригенным грунтам (суглинок, насыпной грунт) с пониженными скоростями продольных волн ($V_p = 250\text{-}600 \text{ м/с}$) и поперечных волн

($V_s = 150-300$ м/с) и низкими значениями коэффициента Пуассона ($\mu < 0,15$). Граница рыхлых отложений приблизительно соответствует скоростной изолинии $V_p = 700$ м/с. Второй и третий горизонты связаны с карбонатно-гипсовыми карстующимися породами, отличающимися по структурно-прочностным характеристикам. Наиболее показательным упругим параметром для определения кавернозных зон и идентификации подземных пустот является коэффициент Пуассона. Его нормальные значения для монолитных и слабо дислоцированных пород составляют 0,25-0,45. Значения $\mu < 0,15$ свидетельствуют о сильном разуплотнении грунтов, характерном для трещиновато-кавернозных пород, а нулевые и кажущиеся отрицательные значения μ позволяют выделить подземные пустоты.

На полученном разрезе коэффициента Пуассона выделяются две зоны аномально низких значений на глубине 12-18 м (ПК 30-40 м и 60-65 м), говорящие о возможном нарушении структурной целостности грунтов с образованием каверн и подземных пустот. Результаты ВЭЗ на отметке 65 м (В-6) подтверждают наличие здесь карстовой воронки, заполненной глинистыми отложениями до глубины 16 м. О начавшейся просадке грунта свидетельствует появление трещин на стене дома и в одной из квартир. Аномалия в районе ПК 30-40 м указывает на вероятное нахождение еще более объемной карстовой полости [Давыдов и др., 2018].

5. Изучение оползневого склона вблизи эксплуатируемого газопровода. Описываемый участок (газопровод СРТО-Торжок) находится в Архангельской области, в 3 км от южной границы г. Котлас, на правом берегу р. Малая Северная Двина. Газопроводы относятся к особо ответственным сооружениям.

Интересная информация, связанная с оползнями на рассматриваемом участке, получена в результате картирования в плане элементов неоднородности по данным электрозондирования. Были околтурены три грунтовых тела, выявляющие структуру оползня на этом участке (рис. 4):

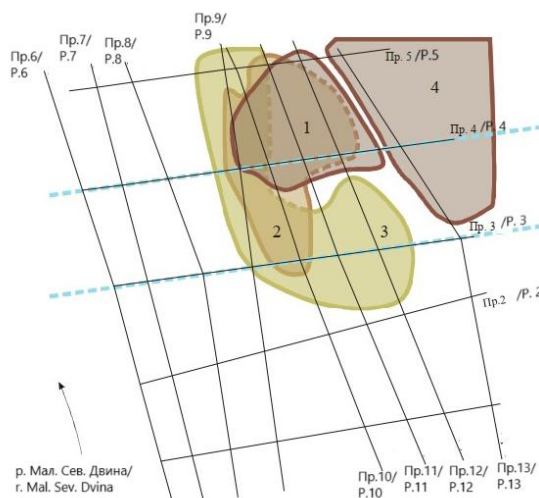


Рис. 4. Расположение элементов строения разреза по данным ВЭЗ, связываемых с оползневыми грунтами (элементы 1-3):

1 – суглинки с гравием и галькой; 2 – пески разуплотненные; 3 – пески с глинами;
4 – суглинки с гравием и галькой, залегающие в ненарушенном состоянии /

Fig. 4. Location of structural elements of the section according to VES data, associated with landslide soils (elements 1-3):

1 – loams with gravel and pebbles; 2 – decompacted sands; 3 – sands with clays;
4 – loams with gravel and pebbles, occurring in an undisturbed state

1) суглинки с гравием и галькой, отмеченные в разрезе скважин № № 004, 006 и 1427, образующие в плане изометричное тело мощностью 1-5,5 м. Минимальные отметки его подошвы около 55 м, в рельефе местности телу соответствует локальное возвышение; 2) пески с пониженной плотностью, тело неправильной формы (в плане), залегает под суглинками; мощность 1-6 м, минимальные отметки подошвы около 52 м, контуры тела тоже находят отражение в положительной форме рельефа местности; 3) грунты существенно глинистого состава составляют нижнее тело, выделенное по пониженным значениям электросопротивления, по гипсометрическим отметкам тело приурочено к подошве ИГЭ-11, эти грунты мощностью ~3 м вскрыты скважиной № 446, минимальная отметка подошвы 50 м.

Схема изогипс поверхности ИГЭ-21 по данным электроразведки говорит о наличии ложбины (переуглубления в поверхности ИГЭ-21) вблизи проектируемой резервной нитки (профиль 4). Это может быть связано как с водной эрозией, так и с древними оползневыми процессами. Полученные материалы геофизических исследований позволили достаточно уверенно выявить и картировать в плане оползневые образования, но не позволили повсеместно определить подошву оползня [Воронков и др., 2008].

6. Диагностирование оползнеопасных зон прибортового массива разреза «Ангренский». Разрез находится в Ташкентской области, г. Ангрен. Методы исследования: сейсмические исследования (методика кругового сейсмического зондирования), электропрофилирование.

В качестве основного результата обработки данных кругового сейсмического зондирования (КСЗ) определена величина коэффициента анизотропии $K_a = V_{p\parallel} / V_{p\perp}$, характеризующая потенциальную опасность оползнеобразования на изучаемом участке. $V_{p\parallel}$ и $V_{p\perp}$ – скорости распространения продольной волны в направлении, параллельном плоскости разуплотнения массива и перпендикулярном к ней соответственно. На рис. 5 графики изменения величины K_a по сейсмопунктам (СП), расположенным примерно параллельно бровке борта, на различных стадиях наблюдения и в зависимости от времени на СП, расположенных вблизи борта (СП 131), в средней (СП 132) и тыловой (СП 134) частях потенциально оползнеопасной зоны.

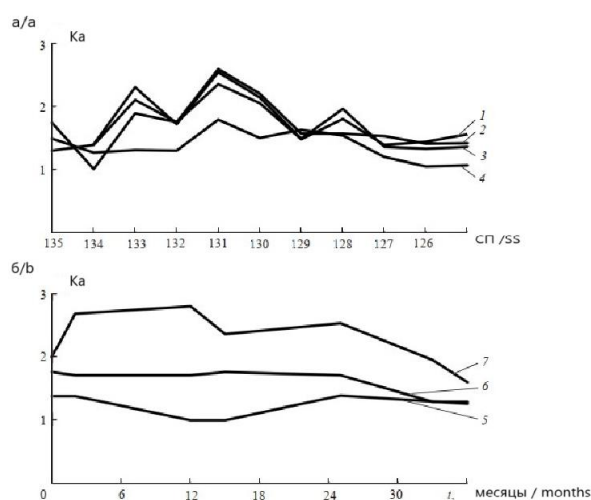


Рис. 5. График изменения величины K_a по номерам СП – а и в зависимости от времени наблюдения – б: 1 – $t = 0$; 2 – $t = 15$ мес.; 3 – $t = 25$ мес.; 4 – $t = 36$ мес.; 5 – СП 134; 6 – СП 132; 7 – СП 131 /

Fig. 3. Graph of change K_a by seismic station number (SN) – а and by time of observation – б: 1 – $t = 0$; 2 – $t = 15$ months; 3 – $t = 25$ months; 4 – $t = 36$ months; 5 – SN 134; 6 – SN 132; 7 – SN 131

Из приведенных результатов следует, что на границах геофизического профиля (СП134-СП135 и СП127-СП125) величина K_a находится в диапазоне $K_a = 1,04\text{--}1,73$, в то время как в центральной части профиля (СП 133-СП 130) она достигает максимальных значений $K_a = 2,00\text{--}2,80$ на интервале $t = 12\text{--}24$ мес. В дальнейшем (при $t > 24$ мес.) с образованием на земной поверхности борта трещин отрыва произошла разгрузка массива, приведшая к снижению анизотропии механических, акустических свойств массива и соответствующему уменьшению уровня $K_a < 1,6$.

Таким образом, экспериментально установлен критерий отнесения состояния участка массива к потенциально оползнеопасному по результатам кругового сейсмического зондирования – $K_a > 1,6$. Результатом электропрофилирования явилось определение границ зон увлажнения изучаемого объекта [Караблин, Простов, 2020].

7. Исследование участка деформации автодороги, построенной на мерзлом основании. Участок исследования, подверженный просадкам и оползневым деформациям, находится между федеральной трассой «Амур» и г. Чита в Забайкальском крае. Ранее здесь уже проводились инженерно-геологические изыскания с привлечением геофизических методов (ВЭЗ, ЭП). Однако сложность объекта и неполнота геофизических исследований не позволили тогда достичь достаточной информативности.

Настоящие же исследования проводились с использованием современной технологии электротомографии, которая показала высокую эффективность в изучении криолитозоны [Nauck, Kneisel, 2008 и др.]. На площади работ была разбита сеть профилей, расположенных вкрест простираения автодороги. Двумерные массивы данных по профилям преобразовывались в трехмерный куб данных, после чего выполнялась трехмерная инверсия. По результатам 3D инверсии строились объемные модели распределения УЭС в среде, по которым выполнялись погоризонтные срезы для построения карт УЭС на разных глубинах. Пример геоэлектрического разреза через претерпевший деформацию участок дороги по одному из профилей (№ V) показан на рис. 6.

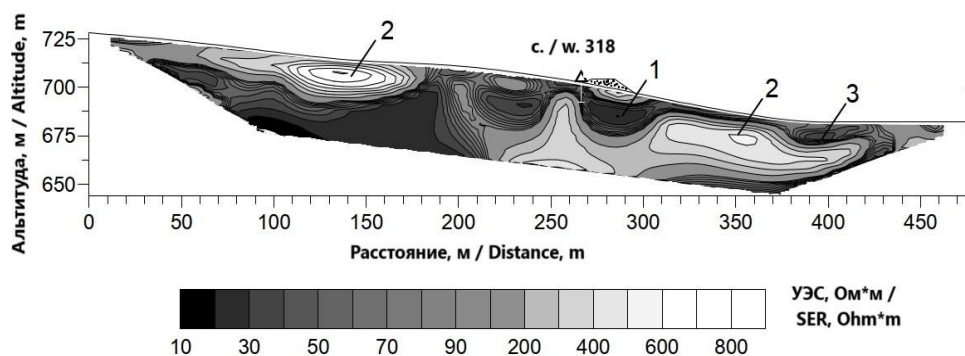


Рис. 6. Геоэлектрический разрез по профилю V [21]:

1 – чаша протаивания под автодорогой; 2 – многолетнемерзлые породы;
3 – подрусловой талик руч. Песчанка /

Fig. 6. Geoelectric section along profile V:

1 – thawing bowl under the road; 2 – permafrost; 3 – underbed talik of the stream. Peschanka

На разрезе выделяются комплексы пород высокого (более 200 Ом·м) и низкого (менее 50 Ом·м) электросопротивления. Породы с высоким УЭС интерпретируются как многолетнемерзлые. Их мощность оценивается в 25-30 м. Профиль № V прохо-

дит через скважину № 318. В интервале ПК 100-160 профиля № V в разрезе выделяется интенсивная аномалия высокого сопротивления, вызванная многолетнемерзлыми грунтами. Ниже дороги в интервале 300-370 м развиты оползневые ступени. На геоэлектрическом разрезе видно, что поверхностью скольжения является кровля пород высокого УЭС [Оленченко, Кондратьев, 2017]. В итоге, электротомография позволила решить задачи исследования: определение мощности многолетнемерзлых грунтов, установление причин деформации участка автодороги.

Выводы

Обзор геофизических методов, применяемых при изучении оползневых процессов, позволил сделать следующие выводы:

1. Геофизические методы позволяют проследивать изменения физико-механических свойств пород, слагающих оползневые массивы, во времени и пространстве. При этом сохраняется сплошность (целостность) изучаемых объектов.

2. Для изучения оползневых склонов, сложенных глинистыми породами, предпочтительнее применять современные томографические методы инженерной геофизики. Сейсмо- и электротомография позволяют с большой детальностью изучить неоднородные структуры с плохо выраженной дифференциацией глинистых пород, уточнить литологию разреза, а также выделить зоны ослабленных пород.

3. По результатам сейсмо- и электротомографических исследований возможно локализовать участки с повышенной влажностью и недостаточными для сопротивления движению глинистых пород прочностными характеристиками.

4. Комплексирование методов сейсморазведки и электроразведки дает возможность определить глубину залегания зеркала скольжения, с большей точностью оценить мощность глинистых и перекрывающих их пород, уточнить направление движения оползня.

5. При выявлении и оконтуривании оползневых объектов наиболее информативны методы КМПВ (сейсморазведка) и ВЭЗ (электроразведка). В условиях неоднородных песчано-глинистых пород для повышения достоверности интерпретации данных ВЭЗ желательно бурение опорных скважин.

6. Совместная интерпретация данных сейсмо- и электроразведочных исследований дает возможность картирования слоев водонасыщенных пород, которые увязываются с зеркалом скольжения оползня.

7. Электроразведка в модификации электротомографии повышает достоверность изучения элементов оползневого объекта, а также позволяет уверенно прогнозировать оползневые процессы.

8. Геофизические исследования позволяют выявить разнонаправленные разрывные нарушения (результат тектонических движений), которые возможно являются бровками будущих оползней. Такой вывод нашел подтверждение в районе Мингечаурского водохранилища (Азербайджан), где через некоторое время после выявления по результатам геофизического мониторинга ранее неизвестных разрывных нарушений произошел оползень.

9. Больше данных об изменениях физико-механических свойств грунтов, необходимых для выявления участков воздействия ОГП, позволяет получить комплексирование различных геофизических методов.

10. Проведенный обзор свидетельствует о востребованности геофизических исследований при изучении ОГП как природного, так и техногенного происхождения.

Заключение

Анализ и обобщение литературных источников и результатов работ многих исследователей позволил провести обзор существующих эффективных геофизических методов, дающих наибольшую информативность при решении инженерно-геологических, геоэкологических и геокриологических задач. За объект исследования в данной работе взят один из опасных геологических процессов – оползень. Приведена информация о характеристиках оползней, разных их классификациях (по тем или иным признакам) и причинах оползнеобразований. Основная часть работы посвящена обзору применяемых геофизических методов (в основном, сейсмо- и электроразведки) при изучении оползневых процессов и их прогнозировании, а также обзору конкретных примеров их использования.

Отличительной особенностью и основным преимуществом геофизических методов (неразрушительных) является тот факт, что они позволяют наблюдать за изменениями строения и физико-механических свойств слагающих оползневой массив пород в пространстве и времени без нарушения их сплошности. Кроме того, применение неразрушительных методов инженерной геофизики существенно снижает затраты времени и средств, при этом являясь наиболее целесообразным и эффективным способом изучения опасных геологических процессов.

Литература

1. Бурлуцкий С.Б., Кудашов Е.С. Оценка инженерно-геологических условий оползневых склонов: учебно-методическое пособие. – С-Пб.: Лема, 2018. – 35 с.
2. Воронков О.К., Сигачева Н.Н., Моторин Г.А., Ушакова Л.Ф. Геофизические исследования оползневого склона вблизи эксплуатируемого газопровода. // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2008. – Т. 250. – С. 92–99.
3. Давыдов В.А., Щапов В.А., Цай Г.А. Изучение опасных природных и техногенных геологических процессов с помощью геофизических методов. // Известия Уральского государственного горного университета. – 2018. – № 2 (50). – С. 65–71.
4. Ежов В.С., Хорошилов В.С. Строение и классификация оползней. // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 6. – С. 54–61.
5. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. – 310 с.
6. Ескин А.Ю., Джурик В.И., Серебrenников С.П., Брыжак Е.В., Демин А.А. Геофизические исследования участка оползня в районе поселка Харанцы на острове Ольхон. // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2016. – № 4 (57). – С. 130–136.
7. Заалишвили В.Б., Голик В.И. Геофизическое обеспечение горного производства. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 85–98.
8. Караблин М.М., Простов С.М. Диагностирование оползнеопасных зон прибортового массива разреза «Ангренский» по данным сейсмо- и электроразведки. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – № 1. – С. 48–59.
9. Керимов И.А., Гакаев Р.А., Батукаев А.А. Изучение оползневых процессов горных территорий Чеченской Республики: системно-методологические основы. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2024. – Т. 9. № 2(36). – С. 34–41.
10. Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Геофизические исследования на карбоновом полигоне Чеченской Республики. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 49–62.

11. Кюнтцель В.В. Закономерности оползневой процесса на европейской территории СССР и его региональный прогноз. М.: Недра, 1980. – 210 с.
12. Оленченко В.В., Кондратьев В.Г. Геофизические исследования в пределах участка деформаций автодороги, построенной на мерзлом основании. // Вестник Северо-Восточного государственного университета. – 2017. – №27. – С. 116–119.
13. Павлов А.П. Оползни Симбирского и Саратовского Поволжья. М.: Университетская типография, 1903. – 69 с.
14. Пендин В.В. Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: ЛЕНАНД, 2015. – 316 с.
15. Петров Н.Ф. Оползневые системы. Простые оползни (аспекты классификации). Киселев: Штиинца, 1988. – 226 с.
16. Попов И.В. Инженерная геология. М.: МГУ, 1952. – 512 с.
17. Саваренский Ф.П. Опыт построения классификации оползней. // Труды I Всесоюзного оползневой совещания. Л.; Москва: ОНТИ, 1935. – С. 29–37.
18. Саламов А.М., Габибов Ф.Г., Богомолова О.А. Исследование оползневых процессов на правом берегу Мингечаурского водохранилища методами электроразведки. // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2010. – №20 (39). – С. 33–39.
19. Тихвинский И.О. Оценка и прогноз устойчивость оползневых склонов. М.: Наука, 1988. – 144 с.
20. Чаплыгин Д.Е. Использование методов электроразведки для прогноза оползневых процессов на трассе магистральных трубопроводов. // Сборник статей II Международной научно-практической конференции «Развитие современной молодежной науки: опыт теоретического и эмпирического анализа». Петрозаводск: Новая наука. – 2021. – С. 254–260.
21. Шуляков Д.Ю. Прогнозирование оползней: обзор методов. // Сборник статей Географические исследования Краснодарского края. Вып. 5. Краснодар: КГУ, 2010. – С. 55–57.
22. Anterrieu O., Chouteau M., Aubertin M. Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine. // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2010. – Vol. 69. No. 4. – pp. 533–548.
23. Hauck C., Kneisel C. Applied geophysics in periglacial environments. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511535628.
24. Power C., Tsourlos P., Ramasamy M., Nivorlis A., Mkandawire M. Combined DC resistivity and induced polarization (DC-IP) for mapping the internal composition of a mine waste rock pile in Nova Scotia, Canada. // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 150. – pp. 40–51.
25. Sjö Dahl P., Dahlin T., Johansson S. Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden. // Environmental Geology. – 2005. – Vol. 49. No. 2. – pp. 267–273.
26. Sloan S.D., Peterie S.L., Miller R.D., Ivanov J., Schwenk J.T., McKenna J. R. Detecting clandestine tunnels using near-surface seismic techniques. // Geophysics. – 2015. – Vol. 80. No. 5. – pp. 127–135.
27. Vorobyov A.E., Hovhannisyan A.H., Kozhogulova G.K. Identifying the main features of landslide movement and developing the basic mechanisms. // In: Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Metallurgy, Material Science, Mining Engineering. – 2022. – No. 1. – pp. 97–109.
28. Yang J., Shragge J., Girard A.J., Gonzales E., Ticona Ja., Minaya A., Krahenbuhl R. Seismic characterization of a landslide complex: a case history from Majes, Peru. // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. No. 18. – pp. 1–15.
29. Zakaria M.T., Mohd muztaza N., Zabidi H., Salleh A.N., Mahmud N., Rosli F.N. Integrated analysis of geophysical approaches for slope failure characterization. // Environmental Earth Sciences. – 2022. – Vol. 81. No. 10. – pp. 1–21.

References

1. Burlutsky S.B., Kudashov E.S. Assessment of engineering-geological conditions of landslide slopes. Educational manual. Saint Petersburg. Lema. 2018. 35 p. (In Russ.)
2. Voronkov O.K., Sigacheva N.N., Motorin G.A., Ushakova L.F. Geophysical studies of a landslide slope near an operating gas pipeline. Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after. B.E. Vedeneev. 2008. Vol. 250. pp. 92–99. (In Russ.)
3. Davydov V.A., Shchapov V.A., Tsai G.A. Study of hazardous natural and anthropogenic geological processes using geophysical methods. Proceedings of the Ural State Mining University. 2018. No. 2 (50). pp. 65–71. (In Russ.)
4. Ezhov V.S., Khoroshilov V.S. Structure and classification of landslides. Interexpo Geo-Siberia. 2022. Vol. 6. pp. 54–61. (In Russ.)
5. Emelyanova E.P. Basic patterns of landslide processes. Moscow. Nedra. 1972. 310 p. (In Russ.)
6. Eskin A.Yu., Dzhurik V.I., Serebrennikov S.P., Bryzhak E.V., Demin A.A. Geophysical studies of the landslide site near the village of Kharantsy on Olkhon Island. Proceedings of the Siberian Branch of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits. 2016. No. 4 (57). pp. 130–136. (In Russ.)
7. Zaalishvili V.B., Golik V.I. Geophysical support for mining production. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 85–98. (In Russ.)
8. Karablin M.M., Prostov S.M. Diagnosis of landslide-hazardous zones of the near-edge massif of the Angrensky section based on seismic and electrical survey data. Proceedings of Higher Educational Institutions. Mining magazine. 2020. No. 1. pp. 48–59. (In Russ.)
9. Kerimov I.A., Gakaev R.A., Batukaev A.A. Study of landslide processes in mountain areas of the Chechen Republic: systemic and methodological foundations. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2024. Vol. 9. No. 2(36). pp. 34–41. (In Russ.)
10. Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A. Geophysical research on the carbon polygon of the Chechen Republic. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 49–62. (In Russ.)
11. Kuntzel V.V. Regularities of the landslide process on the European territory of the USSR and its regional forecast. Moscow. Nedra. 1980. 210 p. (In Russ.)
12. Olenchenko V.V., Kondratyev V.G. Geophysical research within the deformation area of a road built on a frozen foundation. *Bulletin of the North-Eastern State University*. 2017. No. 27. pp. 116–119. (In Russ.)
13. Pavlov A.P. Landslides of the Simbirsk and Saratov Volga regions. Moscow. University Printing House. 1903. 69 p. (In Russ.)
14. Pendin V.V., Fomenko I.K. Methodology for assessing and forecasting landslide hazard. Moscow. LENAND. 2015. 316 p. (In Russ.)
15. Petrov N.F. Landslide systems. Simple landslides (classification aspects). Chisinau. Shtiintsa. 1988. 226 p. (In Russ.)
16. Popov I.V. Engineering geology. Moscow. MSU. 1952. 512 p. (In Russ.)
17. Savarensky F.P. Experience in constructing a classification of landslides. In: Proceedings of the I All-Union landslide Meeting. Leningrad. Moscow. ONTI. 1935. pp. 29–37. (In Russ.)
18. Salamov A.M., Gabibov F.G., Bogomolova O.A. Study of landslide processes on the lower bank of the Mingachevir reservoir using electrical prospecting methods. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series. Construction and architecture*. 2010. No. 20 (39). pp. 33–39. (In Russ.)
19. Tikhvinsky I.O. Assessment and forecast of stability of landslide slopes. Moscow. Nauka. 1988. 144 p. (In Russ.)
20. Chaplygin D.E. Using electrical prospecting methods to predict landslide processes along the route of main pipelines. In: Proceedings of the II International Scientific and Practical

Conference “Development of modern youth science: experience of theoretical and empirical analysis”. Petrozavodsk. Novaya nauka. 2021. pp. 254–260. (In Russ.)

21. Shulyakov D.Yu. Landslide forecasting: a review of methods. In: Proceedings of the Geographical studies of the Krasnodar region. Issue 5. Krasnodar. KSU. 2010. pp. 55–57. (In Russ.)

22. Anterrieu O., Chouteau M., Aubertin M. Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2010. Vol. 69. No. 4. pp. 533–548.

23. Hauck C., Kneisel C. *Applied geophysics in periglacial environments*. Cambridge. Cambridge University Press. 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511535628.

24. Power C., Tsourlos P., Ramasamy M., Nivorlis A., Mkandawire M. Combined DC resistivity and induced polarization (DC-IP) for mapping the internal composition of a mine waste rock pile in Nova Scotia, Canada. *Journal of Applied Geophysics*. 2018. Vol. 150. pp. 40–51.

25. Sjö Dahl P., Dahlin T., Johansson S. Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden. *Environmental Geology*. 2005. Vol. 49. No. 2. pp. 267–273.

26. Sloan S.D., Peterie S.L., Miller R.D., Ivanov J., Schwenk J.T., McKenna J.R. Detecting clandestine tunnels using near-surface seismic techniques. *Geophysics*. 2015. Vol. 80. No. 5. pp. 127–135.

27. Vorobyov A.E., Hovhannisyan A.H., Kozhogulova G.K. Identifying the main features of landslide movement and developing the basic mechanisms. In: Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Metallurgy, Material Science, Mining Engineering. 2022. No. 1. pp. 97–109.

28. Yang J., Shragge J., Girard A.J., Gonzales E., Ticona Ja., Minaya A., Krahenbuhl R. Seismic characterization of a landslide complex: a case history from Majes. Peru. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 18. pp. 1–15.

29. Zakaria M.T., Mohd muztaza N., Zabidi H., Salleh A.N., Mahmud N., Rosli F.N. Integrated analysis of geophysical approaches for slope failure characterization. *Environmental Earth Sciences*. 2022. Vol. 81. No. 10. pp. 1–21.