



Научная статья

УДК 624.131.43

EDN: DGQEAM

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-281-295

Комплексный подход к лабораторным исследованиям деформационно-прочностных свойств техногенных грунтов на примере обвально-осыпных отложений карьера «Айхал» (Якутия)

Е.П. Душкин^{a,✉}, В.В. Акулова^b, А.А. Рыбченко^c

^{a-c}Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

Резюме. Эффективность отработки подкарьерных запасов алмазных кимберлитовых трубчатых Якутии во многом определяется состоянием техногенных предохранительных массивов. Обычно они представляют собой рудоподобную подушку, а иногда – рудный целик, перекрытый техногенно измененными и переотложенными грунтами, которые сформировались в результате интенсификации выветривания и развития гравитационных процессов (осыпей, обвалов, оползней и др.) в бортах карьера. Целью проведенного исследования являлась комплексная оценка деформационно-прочностных свойств техногенных обвально-осыпных отложений, сформированных на дне карьера «Айхал» и определяющих безопасность ведения подземных горных работ. Лабораторные исследования грунтов включали гранулометрический, минералого-петрографический, химический, геомеханический и другие анализы. Дополнительно проведены экспериментальные исследования деформационного потенциала обломочных и дисперсных грунтов. Реализация комплексного подхода к исследованию техногенных отложений позволила выявить их особенности, заключающиеся в высокой степени неоднородности их состояния и свойств. Грунты представлены преимущественно щебнем и дресвой с супесчано-суглинистым заполнителем. Крупнообломочный материал характеризуется широким спектром показателей выветрелости и прочности (от слабо- до сильновыветрелых и от прочных до малопрочных). Наличие малопрочных обломков в составе отложений способствует их преждевременному разрушению. Тонкодисперсные грунты отличаются аномально низкими значениями деформационно-прочностных параметров, что позволило характеризовать их как структурно-неустойчивые, склонные к проявлению текучести.

Ключевые слова: техногенные грунты, обвально-осыпные отложения, Айхал, деформационно-прочностные свойства, лабораторные исследования

Финансирование: Исследование проведено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2024-533, проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»). Работа выполнена с использованием оборудования и инфраструктуры Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук.

Для цитирования: Душкин Е.П., Акулова В.В., Рыбченко А.А. Комплексный подход к лабораторным исследованиям деформационно-прочностных свойств техногенных грунтов на примере обвально-осыпных отложений карьера «Айхал» (Якутия) // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 281–295. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-281-295>. EDN: DGQEAM.

Original article

An integrated approach to laboratory studies of deformation and strength properties of man-made soils on example of landslide deposits of Aikhal open-pit mine (Yakutia)

Egor P. Dushkin^{a,✉}, Varvara V. Akulova^b, Artem A. Rybchenko^c

^{a-c}Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. The efficiency of mining the underground reserves of diamond kimberlite pipes in Yakutia is largely determined by the condition of man-made protective massifs. These typically consist of an ore cushion, or sometimes an ore pillar, overlain by man-made altered and redeposited soils formed as a result of intensified weathering and development of gravitational processes (talus, rock falls, landslides, etc.) within the quarry walls. The purpose of this study is to comprehensively assess the deformation

© Душкин Е.П., Акулова В.В., Рыбченко А.А., 2025



and strength properties of man-made landslide deposits formed at the bottom of the Aikhal open-pit mine and determining the safety of underground mining operations. Laboratory studies of soils included granulometric, mineralogical-petrographic, chemical, geomechanical, and other types of analyses. Additionally, experimental studies of the deformation potential of detrital and dispersed soils were conducted. The use of an integrated approach to studying man-made sediments revealed their distinctive features, including a high degree of heterogeneity in their state and properties. The soils are composed primarily of crushed rock and gravel with sandy loam aggregate. The coarse-grained material is characterized by a wide range of weathering and strength parameters (from slightly to highly weathered and from strong to soft). The presence of soft fragments in the composition of sediments contributes to their premature destruction. Fine-grained soils are characterized by abnormally low values of deformation and strength parameters, which allowed them to be characterized as structurally unstable and prone to yielding.

Keywords: technogenic soils, landslide deposits, Aikhal, deformation and strength properties, laboratory studies

Funding: The study was supported by the Russian Ministry of Education and Science (grant no. 075-15-2024-533, project “Fundamental research of the Baikal natural territory based on a system of interrelated basic methods, models, neural networks and a digital platform of environmental monitoring”). The work was conducted using the equipment and infrastructure of the Centre for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Dushkin E.P., Akulova V.V., Rybchenko A.A. An integrated approach to laboratory studies of deformation and strength properties of man-made soils on example of landslide deposits of Aikhal open-pit mine (Yakutia). *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(3):281-295. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-281-295>. EDN: DGQEAM.

Введение

В результате инженерно-хозяйственной деятельности человека, представленной различными видами строительных, горнодобывающих, сельскохозяйственных и других работ, на поверхности литосферы происходит формирование новых или же преобразование под внешним воздействием уже существующих грунтовых толщ. Такие «новообразования» представлены преимущественно двумя группами отложений: отходами человеческой деятельности (промышленными и бытовыми) и культурными слоями, преобразованными в строительных и производственных целях природными отложениями. К первой группе можно отнести различные отвалы шлаков и золошлаков, гидроотвалы, свалки и т. п., ко второй – железнодорожные насыпи, земляные плотины, дамбы, карьеры, шахты и т. д.¹ Грунты такого типа называются техногенными.

Техногенные образования, как и природные, могут быть представлены скальными, дисперсными (связными и несвязными), а также мерзлыми грунтами. Согласно инженерно-геологической типизации, представленной в ГОСТ 25100-2020², по генетическому принципу они подразделяются на измененные в естественном залегании, перемещенные и антропогенные, а в случае мерзлых типов пород – дополнительно на антропогенные льды и ледогрунты. Каждый тип, в свою очередь, делится на несколько видов в зависимости от

способа своего формирования или изменения. Так, например, измененные в естественном залегании грунты могут быть физически и физико-химически измененными, перемещенные – насыпными и намывными, а антропогенные – отходами производств и бытовыми отходами (в том числе к ним относятся и культурные слои). Группа мерзлых грунтов по способу формирования представлена отложениями, преимущественно созданными путем изменения теплового режима.

Наибольший объем техногенных отложений формируется преимущественно на урбанизированных и промышленных территориях³. К началу XXI века их мировой объем только в результате горнотехнической и строительной деятельности достиг 1500 млрд м³, при этом общий объем промышленных отходов уже составлял свыше 1 млрд т в год [1]. В настоящее время оценить общий объем техногенных отложений практически невозможно, однако точно можно сказать, что он достаточно велик и существует выраженная тенденция к его росту [2, 3].

В связи с необратимым увеличением объема техногенных грунтов, а также их специфическими особенностями (неоднородный минеральный / гранулометрический состав, пространственно-временные изменения физического состояния и деформационно-прочностных свойств) значительно возросло количество как отечественных, так и зарубежных исследований, направленных на

¹ Васильчук Ю.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С., Королев В.А., Трофимов В.Т. Грунтоведение: учебник для студентов вузов / под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ. 2005. 1024 с.

² ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 42 с.

³ Передельский Л.В., Приходченко О.Е. Инженерная геология: учебник для студентов вузов. Ростов н/Д.: Феникс, 2009. 465 с.



изучение данного типа отложений в рамках научных и прикладных целей [4–7].

Изучение различных типов грунтов, в том числе и техногенных, осуществляется в процессе проведения полевых и лабораторных исследований, выполняемых, как правило, по стандартным методикам, указанным в государственных стандартах и других нормативных документах [8]. Однако стоит учитывать, что нормативные документы разработаны преимущественно для природных отложений и в них не всегда принимаются во внимание особенности некоторых типов техногенных грунтов. В зависимости от объекта исследования, условий его местонахождения и типа слагающих образований, а также выполняемых им функций необходимо проводить целый комплекс лабораторных работ, включающий в себя помимо стандартных исследований также дополнительные и экспериментальные. Реализация подобного комплекса позволит выявить специфические особенности техногенных грунтов.

В данной работе рассматриваются методика и результаты применения такого подхода при исследовании техногенных грунтов одного из изучаемых нами объектов алмазодобывающей промышленности Якутии.

Материалы и методы исследования

Объект и материалы исследования. В качестве объекта для исследования была выбрана кимберлитовая трубка «Айхал» и сформированные на дне одноименного карьера техногенные грунты, представляющие собой обвальнo-осыпные отложения. В административном плане трубка расположена на территории Мирнинского района республики Саха (Якутия) и относится к Алакит-Мархинскому кимберлитовому полю, расположенному в юго-западной части Далдыно-Алакитского алмазoносного района. Данная территория характеризуется широким распространением многолетнемерзлых пород, при этом мощность криолитозоны достигает 720 м [9, 10].

Трубка представляет собой крутопадающее сплюснуто-трубчатое тело, сложенное разновозрастными кимберлитовыми брекчиями. Она прорывает субгоризонтально залегающие карбонатные и терригенно-карбонатные отложения нижнего палеозоя (доломиты, мергели, алевролиты, песчаники и др.) [11].

На дне карьера обводненные за счет атмосферных осадков, паводковых, а также

подземных минерализованных вод обвальнo-осыпные отложения сформировали опасный водный объект, наличие которого представляет угрозу для ведения подземных горных работ. Для обеспечения безопасности их проведения был оставлен временный предохранительный рудный целик [12–14].

В качестве материала для исследования были использованы пробы грунта обвальнo-осыпных отложений карьера «Айхал», отобранные в процессе бурения опытных скважин Айхальского горно-обогатительного комбината в период с января по апрель 2022 года. В рамках выполнения хозяйственных работ с институтом «Якутнипроалмаз» в лаборатории инженерной геологии и геоэкологии Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук был проведен комплекс лабораторных исследований их состава, состояния и свойств.

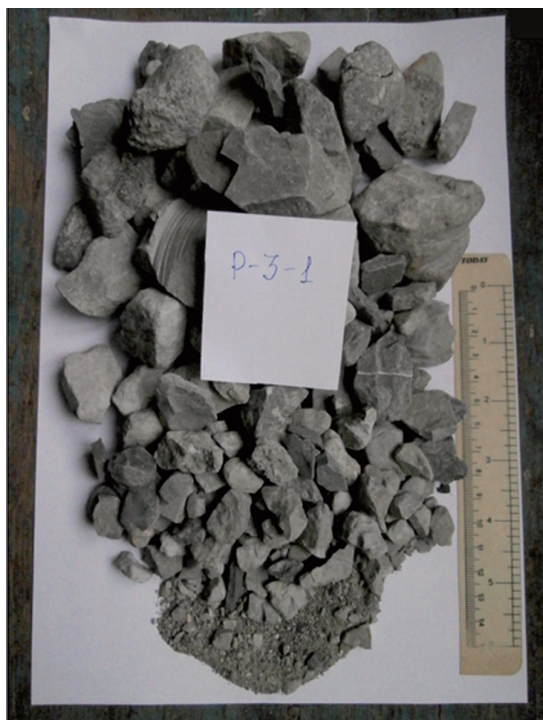
Методика исследования. Поскольку техногенный массив сформирован из отложений, изначально отличающихся друг от друга по составу или состоянию, то и сами техногенные грунты обладают разнородным составом, состоянием и свойствами. Для более корректной их характеристики применяется комплексный подход, заключающийся в выделении имеющихся литологических разностей и детальной оценке их физического состояния и деформационного потенциала [15].

Визуально исследуемые отложения можно разделить две группы:

1) крупнообломочные грунты – обломки вмещающих горных пород и слабосцементированные обломки;

2) тонкодисперсные грунты – песчано-пылевато-глинистый материал (рис. 1).

Тонкодисперсные грунты, присутствующие в обвальнo-осыпном массиве, при повышенной обводненности могут проявлять опасные реологические свойства (ползучесть, релаксация при повышении напряжений и др.). Наличие такого «опасного» материала, находящегося в водном объекте на дне карьера, в дальнейшем приведет к возникновению аварийной ситуации, сопровождающейся неконтролируемым выходом обводненной дисперсной массы в точках выпуска руды. Увеличению его количества помимо осыпания с бортов карьера способствует также разрушение глыб и крупных обломков, особенно малопрочных (выветрелые, трещиноватые и т. д.) в результате воздействия на них внешних факторов [16]. В связи с этим исследование направлено, прежде всего, на оценку потенциала



a



b

Рис. 1. Внешний вид исследуемых техногенных грунтов:

a – щебень с пылевато-песчаным заполнителем; b – супесь с включениями щебня

Fig. 1. Appearance of studied man-made soils:

a – crushed stone with silty sand aggregate; b – sandy loam with crushed stone inclusions

прочности (устойчивости) обломочного и проявления реологических свойств песчано-пылевато-глинистого материала.

Крупнообломочные грунты. Определение их гранулометрического состава проводилось методом ситового отсева с использованием стандартного набора сит. Для характеристики минералогического состава пород выполнялся петрографический (шлифовый) анализ.

В случае исследуемых обвальнo-осыпных отложений среди механических свойств обломков, наиболее отражающих их потенциал к разрушению, рассмотрены выветрелость, истираемость, водоустойчивость и морозостойкость.

Определение деформационно-прочностных параметров проводилось по методикам, указанным в ГОСТ Р 70257-2022⁴. Коэффициенты выветрелости K_{wrt} и истираемости K_{fr} получены по результатам испытаний образцов циклами вращения в полочном барабане.

Поскольку исследуемые отложения обводнены и постоянно находятся в контакте с водной средой, были проведены экспериментальные исследования, направленные на выявление характера взаимодействия обломков с данной

средой в системах «порода – вода» и «порода – рассол». Для оценки пористости, скрытой трещиноватости и потенциальной морозостойкости во время эксперимента дополнительно определялся показатель водопоглощения W_n .

Экспериментальные образцы-дубликаты неправильной формы размером 5 см были помещены в контейнеры, наполненные водой и хлоридным кальциево-магниевым рассолом с минерализацией 98 г/л. В течение нескольких недель визуально фиксировались изменения.

Образцы, находящиеся в воде и рассоле, без видимых признаков разрушения были подвергнуты нескольким циклам заморзания-оттаивания с целью оценки их морозостойкости. Заморозка проходила в морозильной камере при температуре от -25 до -30 °C в течение суток, оттаивание – при комнатной температуре 20–25 °C в течение нескольких часов.

Для слабосцементированных агрегатов дополнительно определялась их водоустойчивость на приборе для размокания грунтов ПРГ-1: замерялись скорость и характер их размокания.

⁴ ГОСТ Р 70257-2022. Грунты. Метод определения истираемости крупнообломочных грунтов (включений) в полочном барабане. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 12 с.



Тонкодисперсные грунты. Гранулометрический состав этой группы определен пипеточным методом с полудисперсной подготовкой образцов (предварительное кипячение с аммиаком), а минералогический – методом порошковой дифракции (объединяющим качественный (фазовый) и полуколичественный рентгеновский анализ) на дифрактометре ДРОН-3.0. Дополнительно по данным химического анализа водных, солянокислых и щелочных вытяжек методом Бобко – Аскинази исследовался состав и содержание таких структуроформирующих компонентов, как водорастворимые соли, полуторные оксиды и карбонаты⁵. Для оценки структурных связей и классификации исследуемых отложений по типам их потенциальной плавуности определялся седиментационный объем V .

Основные деформационно-прочностные параметры получены по стандартным методикам, указанным в ГОСТ 12248.1-2020⁶ и ГОСТ 12248.3-2020⁷. Значения угла внутреннего трения φ и удельного сцепления C для глинистых образцов различной консистенции установлены по результатам испытаний, проведенным методом одноплоскостного среза. Модуль деформации E и коэффициент Пуассона ν для образцов пластичной консистенции (влажность грунта $W = 20,8\%$, плотность грунта $\rho = 2,01 \text{ г/см}^3$) определен методом трехосного сжатия при разном боковом давлении (100, 200, 300 КПа). Испытания проводились на автоматизированном испытательном комплексе АСИС (ООО «НПП Геотек», Россия). Для оценки влагоемкости и водопроницаемости определены относительная деформация набухания E_{sw} , объемная усадка δ_v и коэффициент фильтрации K_f . Испытания проведе-

ны на образцах ненарушенной и нарушенной структуры (пасты).

Экспериментальное исследование подвижности техногенной грунтовой массы при разной степени влажности проведено с использованием метода конуса Абрамса. Достаточно большой объем конуса, а также его форма, позволяют наглядно отследить изменение состояния исследуемых отложений при увеличении влажности и четко зафиксировать момент проявления ими реологических свойств. Предварительно подготовлена опытная рыхлая грунтовая масса супесчано-суглинистого материала с включением щебня (таблица). Для проведения испытаний с учетом присутствия в экспериментальном образце повышенного содержания глинистой фракции выбран следующий шаг расчетной влажности – грунты в воздушно-сухом состоянии ($W = 1,4\%$, $\rho = 1,43 \text{ г/см}^3$), 10, 15, 20, 25, 27, 30, 32, 35 и 40 %.

Результаты исследования и их обсуждение

Крупнообломочные грунты. Эта группа представлена щебенистым (обломки размером более 10 мм составляют 61–83 % от массы образца) и дресвяно-щебенистым (обломки размером 2–10 мм составляют 52–58 %) материалом. По результатам описания шлифов среди обломков распространены преимущественно доломиты, редко встречаются долериты. Содержание доломита в шлифах варьируется от 42 до 96 %, также в значительном количестве присутствует гипс (до 50 %) и терригенный материал (до 20 %). В качестве второстепенных минералов выступают гидрооксиды железа, кварц, кальцит и алеврит; в качестве акцессорных минералов –

Гранулометрический состав опытной грунтовой массы Granulometric composition of the experimental soil mass

Показатель	Значение					
Фракция, мм	> 10	10–7	7–5	5–3	3–2	2–1
Содержание, %	12	0,7	3	3,5	2,8	2,5
Фракция, мм	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,002	< 0,002
Содержание, %	1,3	2,8	10,3	22,1	24,5	14,5

⁵ Методические рекомендации по определению физико-химических свойств почв и грунтов при инженерно-геологических и почвенно-мелиоративных изысканиях / сост. Л.И. Кульчицкий, Ю.Г. Ткаченко, З.А. Савченко [и др.]. М.: в/о «Союзводпроект», 1977. 71 с.

⁶ ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза. М.: Стандартинформ, 2020. 21 с.

⁷ ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020. 33 с.



апатит, глауконит, турмалин и др. В долеритах среди главных минералов выделяются плагиоклаз (20–37 %), пироксен (35–70 %), реже оливин (до 15 %), второстепенные представлены кварцем и рудными минералами (рис. 2).

Для обломков определены следующие значения коэффициентов выветрелости K_{wrt} и истираемости K_{fr} :

– K_{wrt} варьируется от 0,49 до 0,74 д. е., что по классификации ГОСТ 25100-2020² для осадочных пород соответствует слабо- и сильно-выветрелым разновидностям;

– K_{fr} находится в пределах 0,18–0,36 д. е., что позволяет говорить о широком спектре степени прочности обломков: от малопрочных до прочных.

По результатам проведения испытаний на устойчивость обломков к водной среде в системах «порода – вода» и «порода – рассол» установлено, что:

– прочные обломки без видимых повреждений при длительном нахождении в воде или рассоле не претерпевают каких-либо существенных изменений (рис 3, а, b);

– трещиноватые крупные обломки разрушаются до дресвяно-щебенистой и менее размерности при длительном нахождении в воде или рассоле. В случае последнего установлено, что возможность кристаллизации рассола оказывает существенное влияние на раскрытие трещин (рис. 3, с–е). Кристаллизованная соль заполняет свободное пространство и приводит к их дополнительному расширению,

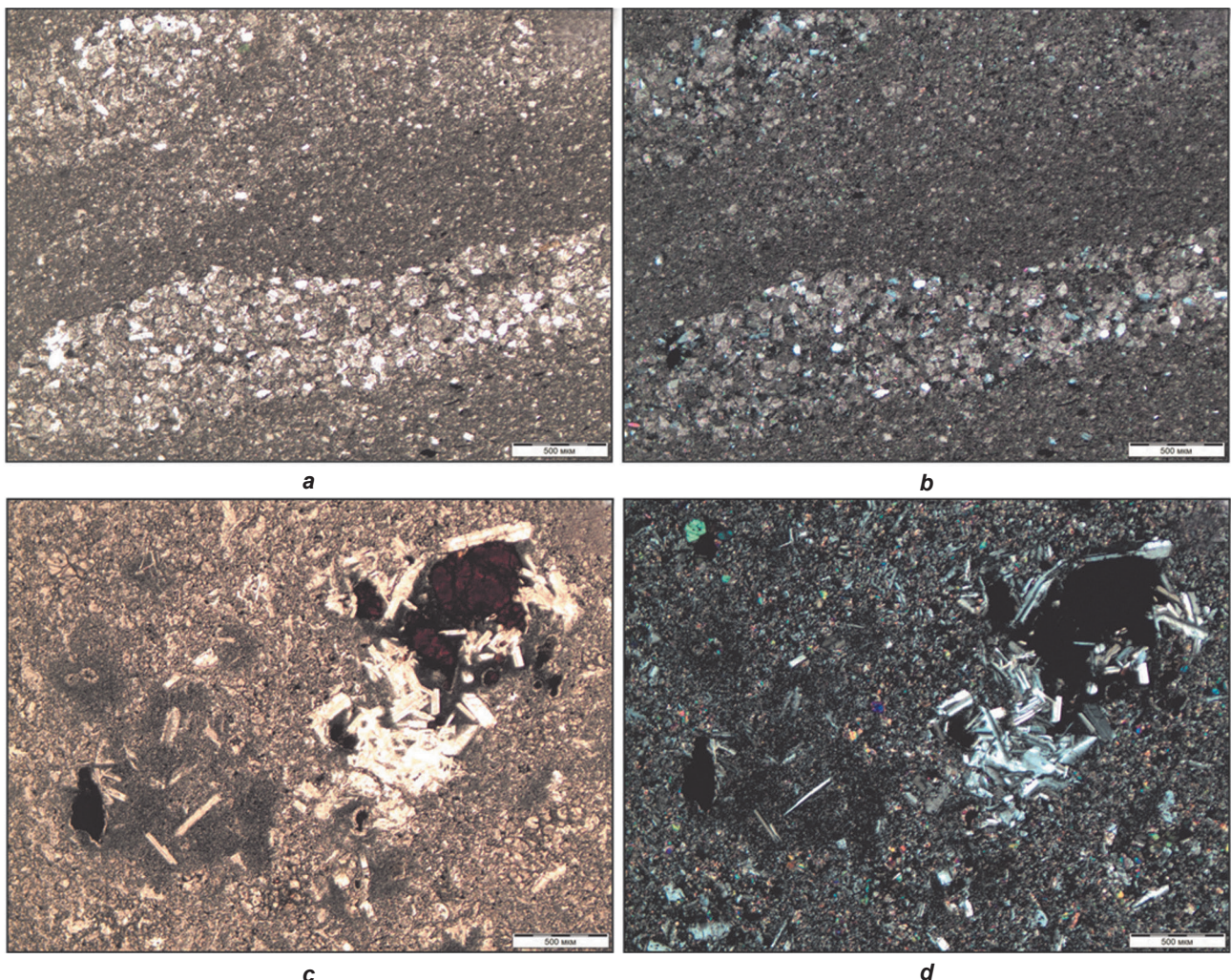


Рис. 2. Шлифы:

а – доломит неравномерно-зернистый, алевролитистый; б – доломит в скрещенных николях;
с – микродолерит порфировый в параллельных николях;
д – микродолерит порфировый в скрещенных николях

Fig. 2. Thin sections:

а – uneven-grained silty dolomite; б – dolomite in crossed nicols;
с – porphyritic microdolerite in parallel nicols; д – porphyritic microdolerite in crossed nicols



что в итоге способствует более быстрому разрушению обломков;

– слабосцементированные обломки при погружении в воду полностью теряют свою прочность и превращаются в рыхлую массу (рис. 3, *f, g*). В зависимости от гранулометрического состава время разрушения варьируется от десятков минут до нескольких часов, что позволяет говорить об их малой и средней водоустойчивости.

При проведении 10 циклов заморозания-оттаивания на водонасыщенных монолитных обломках не было выявлено существенных признаков их разрушения. У данных обломков также отмечаются достаточно низкие значения водопоглощения ($W_n = 2-5,5 \%$). Такое малое количество воды, максимально содержащейся в порах, при заморозании не может привести к разрушению породы. Это позволяет утверждать, что ненарушенный крупнообломочный

материал имеет низкую предрасположенность к проявлению морозобойного растрескивания. Однако трещиноватые разновидности, устойчивые к воде и рассолам, после нескольких циклов заморозания-оттаивания начали разрушаться. После 5-го цикла по трещинам начали откалываться небольшие обломки размером до 0,5 см с образованием тонкодисперсного осадка на дне контейнера, после 7-го цикла – величиной до 1,5 см, при этом предыдущие ранее отделившиеся обломки разрушились до тонкодисперсного состояния (рис. 4).

Тонкодисперсные грунты. Эта группа представлена преимущественно супесью, реже встречаются суглинки. Среди минералов преобладает в основном доломит (23–65 %), кальцит (2–10 %), кварц (10–27 %), полевые шпаты (5–20 %), глины (4–25 %), в меньшем количестве присутствуют гипс и серпентинит. При этом состав глины – полиминеральный:

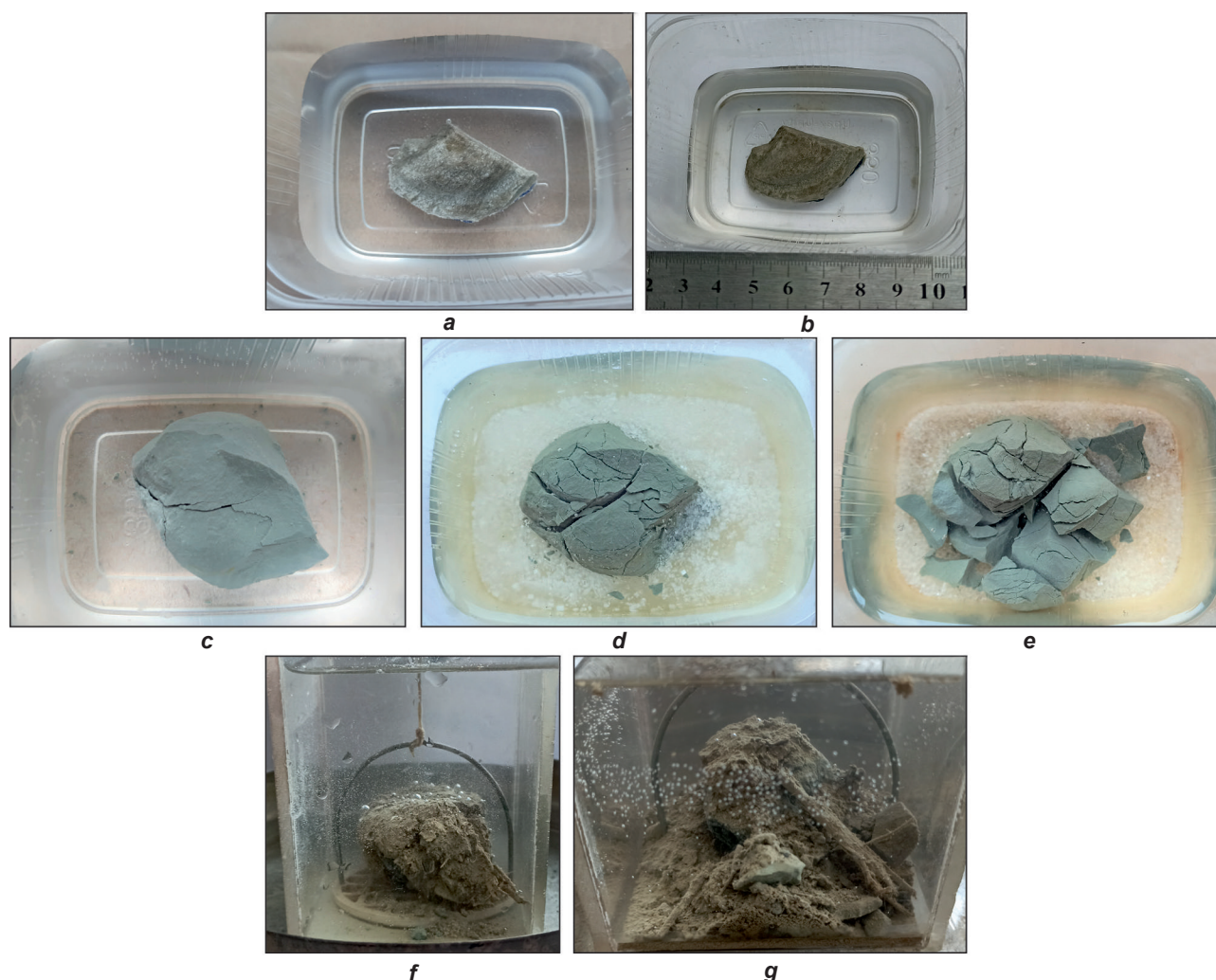


Рис. 3. Характер взаимодействия обломков техногенных грунтов с водой/рассолом:
a, b – прочный доломит; c–e – трещиноватый доломит; f, g – слабосцементированный агрегат
Fig.3. Interaction nature of man-made soil fragments and water/brine:
a, b – strong dolomite; c–e – fractured dolomite; f, g – weakly cemented aggregate

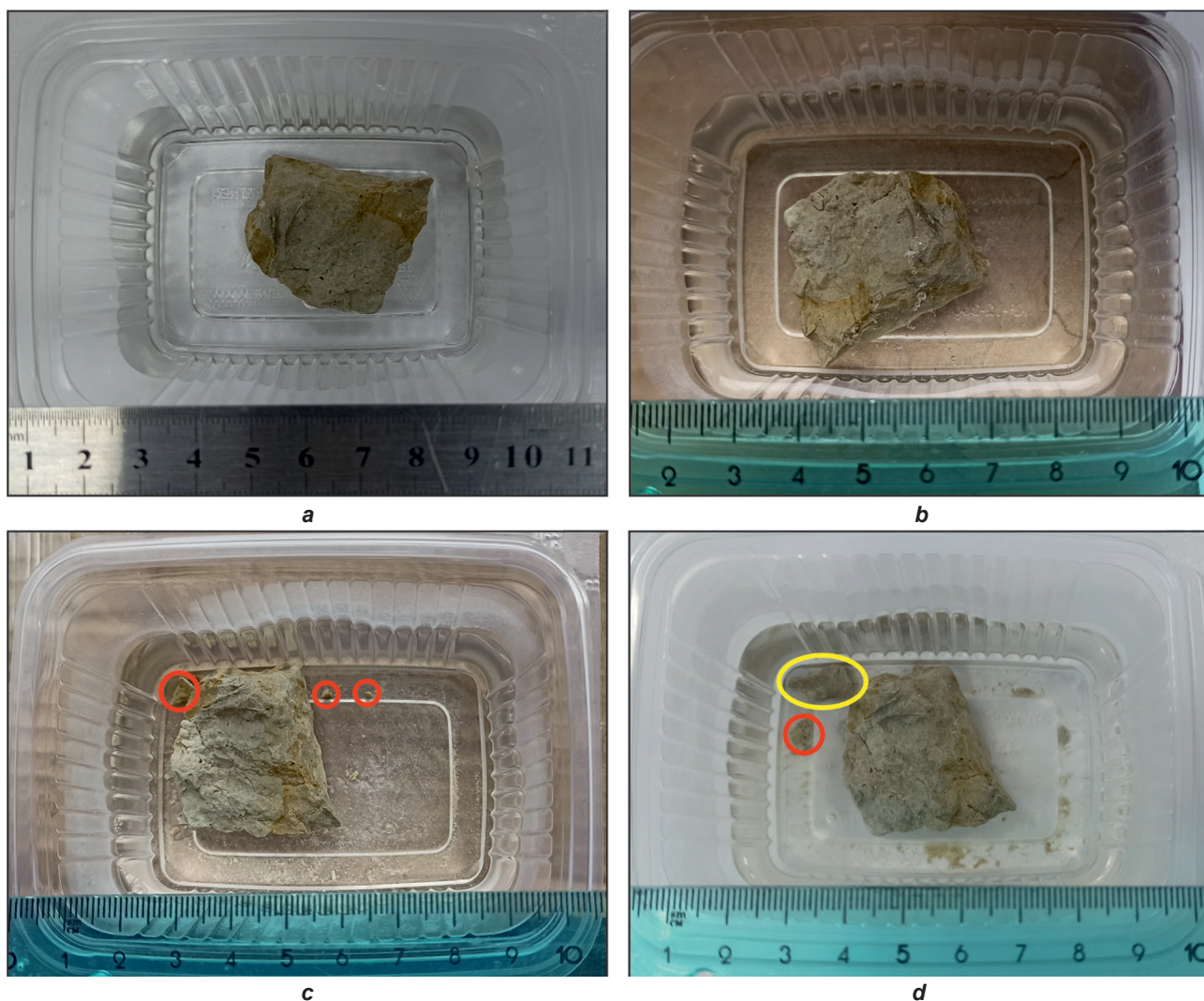


Рис. 4. Разрушение обломка трещиноватого доломита после нескольких циклов промерзания-оттаивания:

a – 0 циклов; b – 3 цикла; c – 5 циклов; d – 7 циклов

Fig. 4. Destruction of a fractured dolomite fragment after several freeze-thaw cycles:

a – 0 cycles; b – 3 cycles; c – 5 cycles; d – 7 cycles

он представлен хлоритом, гидрослюдами и каолинитом; реже смектитом и смешанно-слоистыми минералами.

При исследовании структуроформирующих компонентов выявлен различный характер засоления грунтов: наиболее часто встречаются незасоленные ($S_{ep} = 0,23–0,46 \%$) и избыточно засоленные ($S_{ep} = 8,4–23,1 \%$) разновидности, в меньшей степени средние ($S_{ep} = 1,24–1,25 \%$) и сильнозасоленные ($S_{ep} = 6,7–8,0 \%$). При этом для слабозасоленных преобладает хлоридно-сульфатный тип засоления, а для сильнозасоленных – сульфатный. Содержание полуторных оксидов (R_2O_3) варьируется в пределах от 6,9 до

12,5 %. Отмечается крайне высокая степень карбонатизации отложений. Общее содержание карбонатных солей в среднем составляет 66,5–95,3 % с преобладанием $CaCO_3$ и $MgCO_3$, что объясняется преимущественно карбонатным составом вскрышных пород.

Значения седиментационного объема для техногенных отложений в среднем варьируются в пределах от 3,5 до 6,7 см³, что соответствует II типу ($V = 3,3–10,0$ см³) потенциально плавунных грунтов, характеризующихся пылевато-глинистым составом⁸.

Показатели водопропускных свойств исследуемых грунтов варьируются от водонепроницаемых до водопроницаемых. Для супесчаных

⁸ Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований: учеб. пособие для вузов. Л.: Недра, 1990. 328 с.



отложений коэффициент фильтрации $K_f = 0,05\text{--}0,58$ м/сут., для суглинистых – $0,004\text{--}0,03$ м/сут.

Относительная деформация набухания варьируется от 0,02 до 0,07 д. е. для супесчаных отложений, что соответствует ненабухающим и слабонабухающим грунтам. При этом влажность набухания составляет $\approx 22\text{--}27\%$ и отмечаются достаточно низкие значения объемной усадки (5–9,8 %). У суглинистых отложений значения относительной деформации набухания значительно выше (0,06–0,14 д. е.), наиболее распространенными являются средне- и сильнонабухающие разновидности. Влажность набухания в данном случае уже составляет 30–41 %, а объемная усадка 12–20,5 %.

По результатам испытаний, проведенных методом одноплоскостного среза, установле-

но, что тонкодисперсные грунты независимо от своего состояния (твердая или пластичная консистенция) обладают достаточно низкими значениями прочностных параметров: для супесей – $C = 0,003\text{--}0,04$ МПа, $\varphi = 2,86\text{--}15,79^\circ$; для суглинков – $C = 0,003\text{--}0,015$ МПа, $\varphi = 3,84\text{--}13,48^\circ$. К тому же при увеличении влажности падение удельного сцепления в случае супесчаного образца более существенно (рис. 5). Также стоит отметить, что во время проведения испытаний у образцов, находящихся в мягко- и текучепластичном состоянии ($W = 25\text{--}27\%$), при росте касательной нагрузки не было установлено проявление релаксации напряжений. Данный процесс часто встречается у природных глинистых аналогов, склонных к проявлению реологических свойств [17, 18].

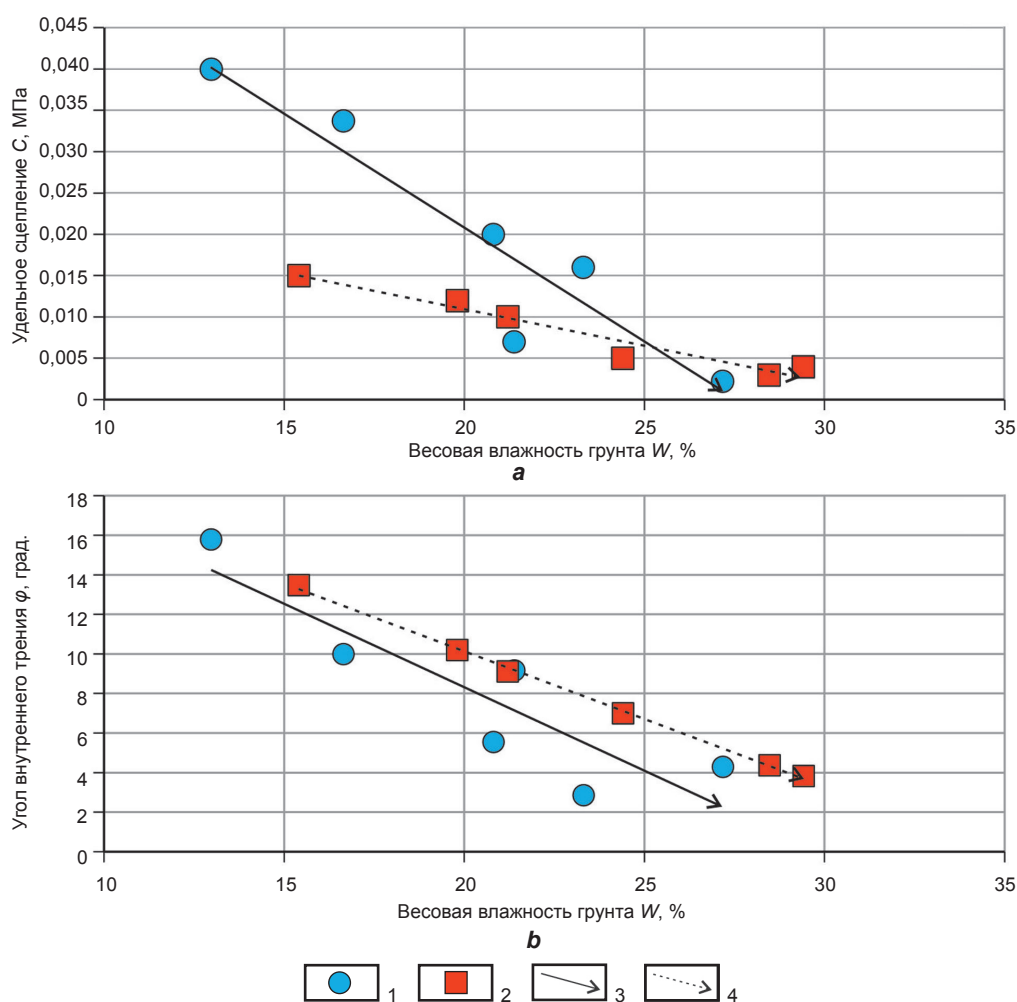


Рис. 5. Изменение прочностных параметров техногенных грунтов при увеличении влажности:

a – удельное сцепление C , МПа; b – угол внутреннего трения φ , град.

1 – супесь; 2 – суглинок; 3 – линия тренда падения прочностных параметров супеси;

4 – линия тренда падения прочностных параметров суглинка

Fig. 5. Variations of strength parameters of man-made soils with increasing moisture content:

a – specific cohesion C , MPa; b – angle of internal friction φ , degrees

1 – sandy loam; 2 – loam; 3 – trend line of sandy loam strength parameters dip;

4 – trend line of loam strength parameters dip



Исследуемые грунты характеризуются повышенной деформируемостью: для супесчаных образцов $E = 1,9\text{--}2,2$ МПа, для суглинистых – $E = 1,4\text{--}1,8$ МПа. Коэффициент Пуассона ν составляет 0,4 для супесей и 0,43 для суглинков, что говорит о достаточной их упругости.

Выявленные низкие значения показателей деформационно-прочностных свойств техногенных грунтов могут быть объяснены отсутствием у них нормальной структурной прочности, природа которой определяется способом формирования техногенного массива, незначительным

периодом его существования, специфическими условиями залегания, а также региональными геолого-структурными и природно-климатическими особенностями [19, 20]. Процесс изменения состава и структурных связей исследуемых грунтов при перемещении на дно карьера обуславливает их меньшую прочность по сравнению с природными отложениями.

Проведение экспериментального исследования подвижности грунтовой массы с использованием конуса Абрамса (рис. 6) выявило следующие особенности изменения ее состояния:

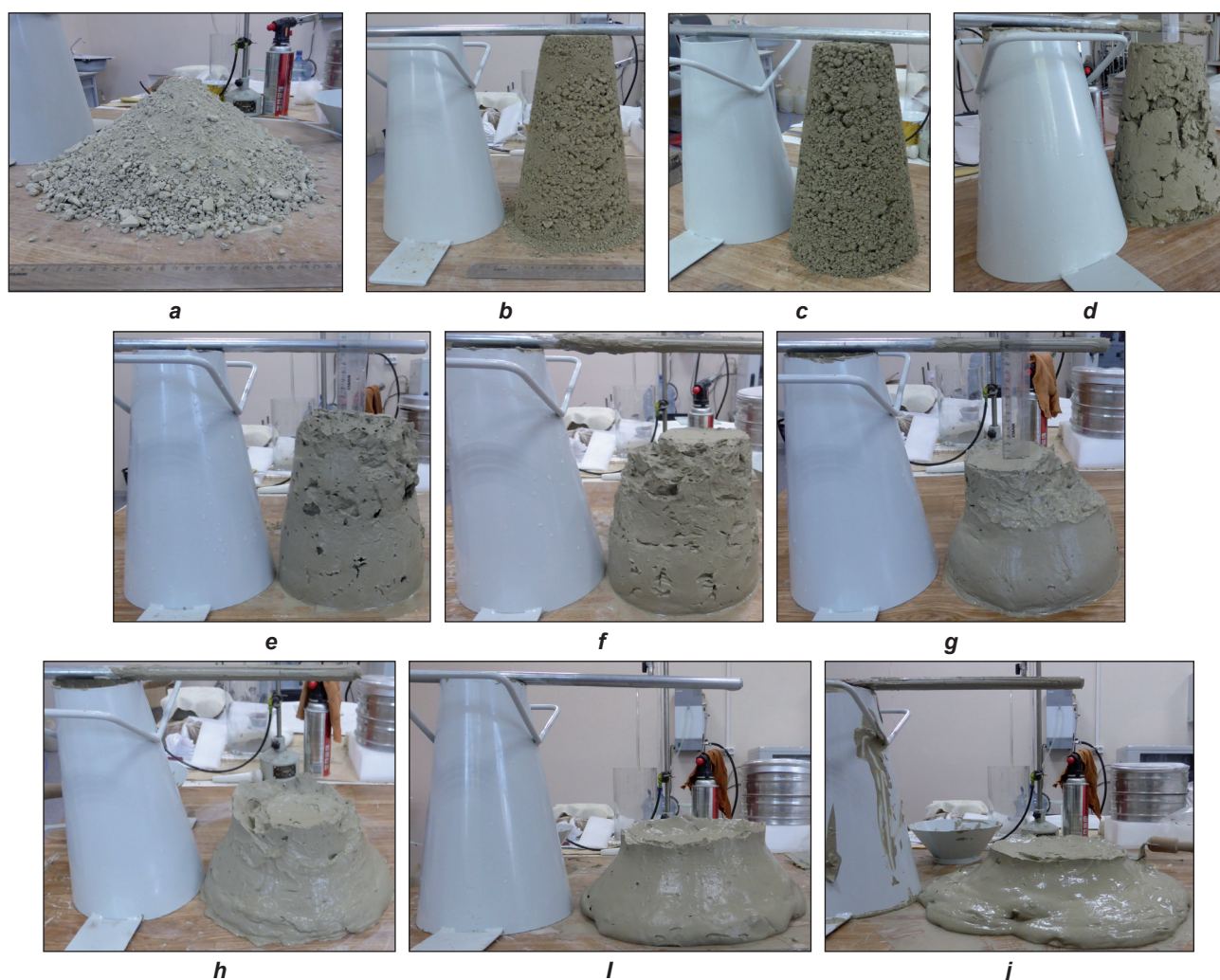


Рис. 6. Исследование изменения формы грунтовой массы при увеличении влажности с использованием конуса Абрамса:

a – грунт с $W = 1,4\%$, $\rho = 1,43$ г/см³, осадка 0 см; b – грунт с $W = 10\%$, $\rho = 1,5$ г/см³, осадка 0 см;
c – грунт с $W = 15\%$, $\rho = 1,6$ г/см³, осадка 0 см; d – грунт с $W = 20\%$, $\rho = 1,98$ г/см³, осадка 0,5–2,2 см;
e – грунт с $W = 25\%$, $\rho = 1,99$ г/см³, осадка 4,5–7,1 см; f – грунт с $W = 27\%$, $\rho = 1,95$ г/см³, осадка 10–11 см;
g – грунт с $W = 30\%$, $\rho = 1,9$ г/см³, осадка 13,5–16 см; h – грунт с $W = 32\%$, $\rho = 1,88$ г/см³, осадка 17,5–18,5 см;
i – грунт с $W = 35\%$, $\rho = 1,84$ г/см³, осадка 20–21 см; j – грунт с $W = 40\%$, $\rho = 1,78$ г/см³, осадка 23–23,5 см

Fig. 6. Study of soil mass shape variations with increasing moisture content using an Abrams cone:

a – soil with $W = 1.4\%$, $\rho = 1.43$ g/cm³, settlement 0 cm; b – soil with $W = 10\%$, $\rho = 1.5$ g/cm³, settlement 0 cm;
c – soil with $W = 15\%$, $\rho = 1.6$ g/cm³, settlement 0 cm; d – soil with $W = 20\%$, $\rho = 1.98$ g/cm³, settlement 0.5–2.2 cm;
e – soil with $W = 25\%$, $\rho = 1.99$ g/cm³, settlement 4.5–7.1 cm; f – soil with $W = 27\%$, $\rho = 1.95$ g/cm³, settlement 10–11 cm;
g – soil with $W = 30\%$, $\rho = 1.9$ g/cm³, settlement 13.5–16 cm; h – soil with $W = 32\%$, $\rho = 1.88$ g/cm³, settlement 17.5–18.5 cm;
i – soil with $W = 35\%$, $\rho = 1.84$ g/cm³, settlement 20–21 cm; j – soil with $W = 40\%$, $\rho = 1.78$ g/cm³, settlement 23–23.5 cm



1. Переход из твердой в пластичную консистенцию происходит при достижении влажности грунта 20 %, в текучую – при 30 %.

2. При увеличении влажности грунтовой массы отмечается увеличение ее плотности. Максимальные значения ($\rho \approx 1,99 \text{ г/см}^3$) достигаются при $W = 25 \%$, затем происходит ее уменьшение.

3. Сформированный конус сохраняет свою форму и не проявляет признаков деформации только при $W < 15 \%$. Далее с увеличением влажности отмечаются пластичные деформации, сопровождающиеся осадкой формы. Максимальную деформацию конус претерпевает при влажности 40 % (осадка формы составляет 23,0–23,5 см). При этом грунтовая масса только начинает растекаться.

4. На протяжении всего эксперимента вода в массе грунта содержится преимущественно в связанном виде.

Повышенное содержание глинистой фракции (до 14,5 %) в составе испытуемой массы, характеризующейся наличием таких глинистых минералов, как хлорит, гидрослюда, каолинит, смектит и смешаннослойные минералы, обуславливает низкую водопропускную способность и достаточно высокую влагоемкость грунтов (влажность набухания до 41 %). Такие отложения, как правило, обладают высокой гидрофильностью. В случае их существенного переувлажнения они продолжают удерживать в себе воду, позволяя ей оставаться в связанном виде. В пределах техногенного осыпного массива это в конечном итоге приведет к образованию опасной текучей подвижной массы, которая будет устремляться в зоны пониженного давления (карстовые полости, подземные горные выработки и т. п.).

Заключение

Реализация комплексного подхода к исследованию деформационно-прочностных свойств техногенных грунтов карьера «Айхал» позволила выявить ряд следующих особенностей:

1. В составе техногенной толщи в значительном количестве присутствуют обломки доломитов щебенистой и дресвяной размерности с супесчано-суглинистым заполнителем.

2. Крупнообломочный материал характеризуется широким спектром показателей выветрелости и прочности. Встречаются разновидности от слабо- до сильновыветрелых ($K_{wrt} = 0,49\text{--}0,74 \text{ д. е.}$) и от малопрочных до прочных ($K_{fr} = 0,18\text{--}0,36 \text{ д. е.}$).

3. Экспериментальные исследования прочности крупных обломков в системах «порода – вода» и «порода – рассол» выявили их разнородный потенциал к разрушению: прочные монолитные разновидности при длительном нахождении в жидкости совсем не разрушаются, трещиноватые – до дресвяно-щебенистой и менее размерности, а слабосцементированные обломки полностью теряют свою прочность и превращаются в рыхлую массу.

4. Трещиноватые разновидности крупнообломочного материала, устойчивые к воде и рассолам, после 5–7 циклов заморозания-оттаивания начинают разрушаться.

5. Тонкодисперсные грунты характеризуются низкими значениями деформационно-прочностных параметров (для супесей: $C = 0,003\text{--}0,04 \text{ МПа}$, $\varphi = 2,86\text{--}15,79^\circ$, $E = 1,9\text{--}2,2 \text{ МПа}$; для суглинков: $C = 0,003\text{--}0,015 \text{ МПа}$, $\varphi = 3,84\text{--}13,48^\circ$, $E = 1,40\text{--}1,8 \text{ МПа}$), что позволяет характеризовать их как структурно-неустойчивые.

6. Повышенная гидрофильность тонкодисперсных грунтов определяется существенным присутствием глинистой фракции и наличием в ее составе смектита и смешаннослойных минералов.

7. По результатам экспериментальных исследований опытной грунтовой массы установлено, что данные образования при существенном увлажнении испытывают значительные деформации и предрасположены к проявлению текучести.

Таким образом, исследование различных техногенных грунтов должно сопровождаться проведением не только стандартных лабораторных работ, включающих определение их гранулометрического, минерального и химического состава, физического состояния, деформационно-прочностных и других свойств. Помимо этого необходимо проводить дополнительные (измерения влагоемкости, седиментационного объема и др.) и экспериментальные (замачивание, использование циклов заморозания-оттаивания, применение конуса Абрамса и др.) исследования, позволяющие расширить представление об особенностях техногенных отложений, выявить их потенциал к разрушению, деформациям, проявлению реологических свойств и т. д. В результате полученные данные будут способствовать более корректной характеристике и оценке как самих техногенных грунтов, так и техногенных литосистем в целом.



Список источников

1. Огородникова Е.Н., Николаева С.К., Дургалян М.Г., Абакумова Н.В. Рациональное использование техногенных грунтов – отходов производств // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник научных трудов XVIII Всерос. науч.-практ. конф. / отв. ред. Т.Н. Ледащева (г. Москва, 23–24 ноября 2017 г.). М.: Изд-во РУДН, 2017. С. 201–206. EDN: YRJKWJ.
2. Несмеянов С.А., Воейкова О.А. Техногенная формация – характерный признак техногенного этапа истории Земли // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 1. С. 18–21. <https://doi.org/10.31857/S0869780920010147>. EDN: MXIHXM.
3. Huot H., Simonnot M.O., Morel J.L. Pedogenetic trends in soils formed in technogenic materials // Soil Science. 2015. Vol. 180. Iss. 4/5. P. 182–192. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000135>.
4. Hulisz P., Pindral S., Kobierski M., Charzyński P. Technogenic layers in organic soils as a result of the impact of the soda industry // Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51. Iss. 10. P. 1133–1141. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100046>.
5. Uzarowicz Ł., Charzyński P., Greinert A., Hulisz P., Kabała C., Kusza G., et al. Studies of technogenic soils in Poland: past, present, and future perspectives // Soil Science Annual. 2020. Vol. 71. Iss. 4. P. 281–299. <https://doi.org/10.37501/sVoloilsa/131615>.
6. Сазонова С.А., Пономарев А.Б. О необходимости комплексного изучения свойств техногенных грунтов и использования их в качестве оснований зданий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2013. № 2. С. 98–106. EDN: RBQSIJ.
7. Лолаев А.Б., Рященко Т.Г., Акулова В.В., Бадоев А.С., Тваури И.В. Комплексное исследование состава, структуры и свойств техногенных грунтов // Научные труды Вольного экономического общества России: труды региональной площадки МАЭФ-2021: экономика, экология, энергетика отдаленных территорий. (г. Владикавказ, 22 мая 2021 года – 24 мая 2022 года). Владикавказ: Изд-во ГГАУ, 2021. С. 122–134. EDN: WQOOXT.
8. Сафиуллина И.С., Хайрулина Л.А., Шайнурова А.Р. К вопросу об изучении физико-механических свойств грунтов для инженерно-геологических целей. Исторические аспекты становления и развития грунтоведения и механики грунтов // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2022. Т. 43. № 2. С. 22–36. <https://doi.org/10.24412/1728-2022-2-22-36>. EDN: AVIMDB.
9. Гладков А.С., Дроздов А.В., Кошкарёв Д.А., Потехина И.А., Афонькин А.М. Оценка структурно-тектонического строения глубоких горизонтов трубки «Айхал» для постановки гидрогеомеханического мониторинга // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2015. № 2. С. 46–56. EDN: ULFFIF.
10. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
11. Кисленко А.Б. Вещественный состав кимберлитов трубки Айхал (Алакит-Мархинское кимберлитовое поле, республика Саха-Якутия) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIII Междунар. симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина. (г. Томск, 8–12 апреля 2019 г.). Томск: Изд-во НИТПУ, 2019. Т. 2. С. 40–42. EDN: NUDENY.
12. Курленя М.В., Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Влияние частичного затопления карьера «Айхал» на напряженно-деформированное состояние рудной потолочины // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 4. С. 23–31. EDN: RADOUF.
13. Янников А.М., Трифонов Н.С., Лепокурова О.Е. Влияние разрывных нарушений на обводнение и газоносность глубоких горизонтов трубки «Айхал» (Республика Саха (Якутия)) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2021. № 1. С. 104–113. <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3342>. EDN: ILANMX.
14. Курилко А.С., Дроздов А.В., Каймонов М.В. Оценка возможности ликвидации водного объекта в карьере «Айхал» // Наука и образование. 2013. № 4. С. 53–57. EDN: RYEYLI.
15. Рященко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь) / отв. ред. В.В. Ружич. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2010. 287 с. EDN: QKJFJF.
16. Янников А.М. Особенности формирования дезинтегрированных толщ в открытых горных выработках в зонах многолетнемерзлых пород месторождения трубки «Айхал» // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы XII Всерос. науч.-практ. конф., посвященной 65-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН (г. Якутск, 23–25 марта 2022 г.). Якутск: Изд-во СВФУ им. М.К. Аммосова, 2022. С. 513–515. https://doi.org/10.52994/9785751332846_2022_106. EDN: DPRDTJ.
17. Карпенко Ф.С. Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2019. № 5. С. 48–60. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019548-60>. EDN: HWRXZT.
18. Осипов В.И., Карпенко Ф.С., Кальберген Р.Г., Кутергин В.Н., Румянцева Н.А. Реологические свойства глинистых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2017. № 6. С. 41–51. EDN: ZRJAWL.
19. Карасев М.А., Поспехов Г.Б., Астапенко Т.С., Шишкина В.С. Анализ моделей прогноза напряженно-деформированного состояния техногенных грунтов низкой прочности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 11. С. 49–69. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_49. EDN: EOTJVE.



20. Вознесенский Е.А. Общая генетическая классификация техногенных грунтов // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2019. № 5. С. 3–9. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-5-3-9>. EDN: NWQUZB.

References

1. Ogorodnikova E.N., Nikolaeva S.K., Durgalyan M.G., Abakumova N.V. Rational use of man-made soils – production wastes. In: Ledashcheva T.N. (ed.). *Aktual'nye problemy ehkologii i prirodopol'zovaniya: sbornik nauchnykh trudov XVIII Vseros. nauch.-prakt. konf. = Relevant problems of ecology and nature management: collected scientific papers of the 18th All-Russian scientific and practical conference*. 23–24 November 2017, Moscow. Moscow: People's Friendship University of Russia; 2017, p. 201-206. (In Russ.). EDN: YRJKWJ.
2. Nesmeyanov S.A., Voeikova O.A. Technogenic formation as a characteristic feature of the technogenic stage in the Earth's history. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2020;1:18-21. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869780920010147>. EDN: MXIHXM.
3. Huot H., Simonnot M.O., Morel J.L. Pedogenetic trends in soils formed in technogenic materials. *Soil Science*. 2015;180(4/5):182-192. <https://doi.org/10.1097/SS.000000000000135>.
4. Hulisz P., Pindral S., Kobierski M., Charzyński P. Technogenic layers in organic soils as a result of the impact of the soda industry. *Eurasian Soil Science*. 2018;51(10):1133-1141. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100046>.
5. Uzarowicz L., Charzyński P., Greinert A., Hulisz P., Kabała C., Kusza G., et al. Studies of technogenic soils in Poland: past, present, and future perspectives. *Soil Science Annual*. 2020;71(4):281-299. <https://doi.org/10.37501/soilsa/131615>.
6. Sazonova S.A., Ponomarev A.B. On the need for a comprehensive study of the properties of man-made soils and their use as building foundations. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2013;2:98-106. (In Russ.). EDN: RBQSIJ.
7. Lolaev A.B., Ryashchenko T.G., Akulova V.V., Badoev A.S., Tvaury I.V. Complex research of structure and properties of the technogenic soils. In: *Nauchnye trudy Vol'nogo ehkonomicheskogo obshchestva Rossii: trudy regional'noi ploshchadki MAEF-2021: ekonomika, ekologiya, energetika otdalennykh territorii = Scientific Works of the Free Economic Society of Russia: Proceedings of the MAEF-2021 regional site: economics, ecology, energy of remote territories*. 22 May 2021 – 24 May 2022, Vladikavkaz. Vladikavkaz: Gorsky State Agrarian University; 2021; p. 122-134. (In Russ.). EDN: WQOOLT.
8. Safiullina I.S., Khairulina L.A., Shainurova A.R. Study of physical and mechanical properties of soils for engineering and geological purposes. Historical aspects and contemporary issues. *Herald of the academy of sciences of the republic of Bashkortostan*. 2022;43(2):22-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1728-2022-2-22-36>. EDN: AVIMDB.
9. Gladkov A.S., Drozdov A.V., Koshkarev D.A., Potekhina I.A., Afon'kin A.M. Evaluation of structural and tectonic framework of Aikhal kimberlite pipe deep horizons for hydrogeomechanical monitoring setting. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2015;2:46-56. (In Russ.). EDN: ULFFIF.
10. Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V. *Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2008, 507 p. (In Russ.).
11. Kisenko A.B. Material composition of Aikhal pipe kimberlites (Alakite-Markha kimberlite field, Sakha Yakutia Republic). In: *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XXIII Mezhdunar. simpoziuma im. akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya rozhdeniya akademika K.I. Satpayeva, 120-letiyu so dnya rozhdeniya professora K.V. Radugina = Problems of Geology and Subsoil Development: Proceedings of the 23rd International Symposium named after Academician M.A. Usov for students and young scientists dedicated to the 120th birth anniversary of Academician K.I. Satpayev, and the 120th birth anniversary of Professor K.V. Radugin*. 8–12 April 2019, Tomsk. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University; 2019, vol. 2, p. 40-42. (In Russ.). EDN: NUDENY.
12. Kurlenya M.V., Baryshnikov V.D., Gakhova L.N. Influence of Aikhal mine partial flooding on the stress-strain state of the ore ceiling. *Fiziko-texnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2013;4:23-31. (In Russ.). EDN: RADOUF.
13. Yannikov A.M., Trifonov N.S., Lepokurova O.E. The impact of faults on the water inflow and gas content of the deep levels of the Aikhal pipe (Republic of Sakha (Yakutia)). *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2021;1:104-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3342>. EDN: ILANMX.
14. Kurilko A.S., Drozdov A.V., Kaimonov M.V. Assessment of the possibility of water body liquidation in Aikhal mine. *Nauka i obrazovanie*. 2013;4:53-57. (In Russ.). EDN: RYELJ.
15. Ryashchenko T.G. *Regional soil science (Eastern Siberia)*. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science; 2010, 287 p. (In Russ.). EDN: QKJFJF.
16. Yannikov A.M. Formation features of disintegrated strata in open mine workings of Aikhal pipe deposit permafrost zones. In: *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii: materialy XII Vseros. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoi 65-letiyu Instituta geologii almaza i blagorodnykh metallov Sibirskogo otdeleniya RAN = Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Proceedings of the 12th All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of the Institute of Geology of Diamond and Precious Metals of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*. 23–25 March 2022, Yakutsk. Yakutsk: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education M.K. Ammosov North-Eastern Federal University; 2022, p. 513-515. (In Russ.). https://doi.org/10.52994/9785751332846_2022_106. EDN: DPRDTJ.
17. Karpenko F.S. Physico-chemical nature of clayey soils strength. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2019;5:48-60 (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019548-60>. EDN: HWRXZT.
18. Osipov V.I., Karpenko F.S., Kal'bergenov R.G., Kutergin V.N., Rumyantseva N.A. Rheological properties of the clay soils. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2017;6:41-51. (In Russ.). EDN: ZRJAWL.



19. Karasev M.A., Pospekhov G.B., Astapenko T.S., Shishkina V.S. Stress–strain behavior prediction models for weak manmade soil. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2023;11:49-69. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_49. EDN: EOTJVE.
20. Voznesenskii E.A. General genetic classification of technogenic soils. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2019;5:3-9. (In Russ.). <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-5-3-9>. EDN: NWQUZB.

Информация об авторах / Information about the authors



Душкин Егор Павлович,

аспирант,
ведущий инженер лаборатории инженерной геологии и геоэкологии,
Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Иркутск, Россия,
✉ dushkin@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0009-0004-2628-1071>

Egor P. Dushkin,

Postgraduate Student,
Leading Engineer of the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology,
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
✉ dushkin@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0009-0004-2628-1071>



Акулова Варвара Викторовна,

кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий эксперт лаборатории инженерной геологии и геоэкологии,
Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Иркутск, Россия,
akulova@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6253-6140>

Varvara V. Akulova,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Expert of the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology,
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
akulova@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6253-6140>



Рыбченко Артем Александрович,

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией инженерной геологии и геоэкологии,
Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Иркутск, Россия,
rybchenk@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2615-8423>

Artem A. Rybchenko,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology,
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
rybchenk@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2615-8423>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Е.П. Душкин – разработка концепции, проведение исследования, визуализация, написание черновика рукописи.
В.В. Акулова – разработка методологии, научное руководство, проведение исследования, редактирование рукописи.
А.А. Рыбченко – проведение исследования, редактирование рукописи.
Egor P. Dushkin – conceptualization, investigation, visualization, writing – original draft.
Varvara V. Akulova – methodology, supervision, investigation, writing – editing.
Artem A. Rybchenko – investigation, writing – editing.



Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 28.06.2025; одобрена после рецензирования 03.09.2025; принята к публикации 15.09.2025.

The article was submitted 28.06.2025; approved after reviewing 03.09.2025; accepted for publication 15.09.2025.