



Научная статья

УДК 624.131.1

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-197-210>



Инженерно-геологическая оценка скальных грунтов на примере анализа коллекции образцов Албазинского месторождения

Тамара Гурьевна Рященко^a, Егор Александрович Маслов^b, Евгений Вадимович Брыжак^c,
Татьяна Александровна Корнилова^d, Юлия Владимировна Вашестюк^e,
Александр Юрьевич Болотнев^f

^{a-d}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

^{e,f}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Вашестюк Юлия Владимировна, vashestyuk_yv@istu.edu

Резюме. В данной статье представлена инженерно-геологическая оценка скальных грунтов Албазинского месторождения (север Хабаровского края, Россия), проведенная на примере анализа коллекции образцов различных петрографических типов определенных геологических формаций. Цель исследований заключалась в реализации специально разработанной комплексной методической схемы, включающей оптический метод (анализ шлифов), измерение сейсмических (поверхностное и сквозное прозвучивание образцов для определения скорости продольных сейсмических волн), прочностных (вертикальное сжатие и растяжение) и физических (плотность и водопоглощение) свойств. На основе полученных данных выполнен сравнительный анализ образцов по результатам данных сейсмических, прочностных и физических свойств с учетом петрографической информации. Установлена анизотропия по сейсмическим и прочностным свойствам, определены коэффициенты корреляции между показателями свойств с помощью программы кластерного анализа. На примере материалов коллекции показано, что различия скорости продольных сейсмических волн и прочности определяются текстурно-структурными особенностями и составом скальных грунтов, которые изучаются на микроуровне.

Ключевые слова: скальный грунт, петрографический шлиф, структура, текстура, состав, сейсмические свойства, прочностные свойства, физические свойства, кластерный анализ

Для цитирования: Рященко Т. Г., Маслов Е. А., Брыжак Е. В., Корнилова Т. А., Вашестюк Ю. В., Болотнев А. Ю. Инженерно-геологическая оценка скальных грунтов на примере анализа коллекции образцов Албазинского месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 2. С. 197–210. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-197-210>.

Original article

Engineering-geological assessment of rocky soils based on the analysis of the collection of Albazinskoye deposit samples

Tamara G. Ryashchenko^a, Egor A. Maslov^b, Evgeny V. Bryzhak^c,
Tatiana A. Kornilova^d, Yulia V. Vashestyuk^e, Alexander Yu. Bolotnev^f

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

^{e,f}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Yulia V. Vashestyuk, vashestyuk_yv@istu.edu

Abstract. The article deals with the engineering-geological assessment of the rocky soils of the Albazinskoye deposit located in the north of the Khabarovsk Territory, Russia conducted on the example of the analysis of the collection of samples of various petrographic types of certain geological formations. The purpose of the research is to implement a specially developed complex methodological scheme including an optical method (analysis of thin rock sections), measurement of seismic (surface and through sounding of samples to determine longitudinal seismic wave velocity), strength (vertical compression and tension) and physical (density and water absorption) properties. Using the obtained data, a comparative analysis of samples is performed based on the results of seismic, strength and physical properties taking into account petrographic information. Anisotropy in terms of seismic and strength properties is established. Using a cluster

© Рященко Т. Г., Маслов Е. А., Брыжак Е. В., Корнилова Т. А., Вашестюк Ю. В., Болотнев А. Ю., 2022



analysis program, the correlation coefficients between property indicators are determined. On example of the materials of the collection, it is shown that the differences in the velocity of longitudinal seismic waves and strength are determined by the textural-structural features and composition of rocky soils, which are studied at the micro level.

Keywords: rocky soil, petrographic rock section, structure, texture, composition, seismic properties, strength properties, physical properties, cluster analysis

For citation: Ryashchenko T. G., Maslov E. A., Bryzhak E. V., Kornilova T. A., Vashestyuk Y. V., Bolotnev A. Yu. Engineering-geological assessment of rocky soils based on the analysis of the collection of Albazinskoye deposit samples. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(2):197-210. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-197-210>.

Введение

Месторождения твердых полезных ископаемых (в настоящее время это преимущественно открытые разработки) можно рассматривать как природно-техногенную систему, изучение которой на современном этапе развития инженерной геологии следует считать наиболее перспективным научным направлением. Инженерная геология месторождений объединяет выполнение следующих задач: организация геологического пространства, оценка динамики земной коры и детальное изучение геологической среды¹. При изучении месторождений твердых полезных ископаемых под детальной характеристикой геологической среды подразумевается инженерно-геологическое классифицирование грунтов, характеристика их состава и свойств, степени обводненности.

В настоящее время для оценки состояния скальных массивов месторождений установлены специальные индексы [1–6]. Кроме того, материалы XII конгресса Международной ассоциации по инженерной геологии и охране окружающей среды, который состоялся в июне 2014 г. в Турине (Италия), подтвердили необходимость детального изучения инженерно-геологических особенностей скальных образцов и массивов на микроуровне [6]. В последние годы среди российских публикаций появились работы по вопросам формирования физико-механических свойств различных петрографических типов пород (скальных грунтов), например эффузивов и базальтоидов [7, 8].

Следует заметить, что на юге Восточной Сибири скальные грунты традиционно изуча-

лись значительно реже, чем дисперсные. В качестве исключения можно назвать сибирские траппы в районах сооружения Братской, Усть-Илимской и Богучанской гидроэлектростанций, а также песчаники юрской угленосной формации в районе Иркутской гидроэлектростанции. Кроме того, некоторые сведения имеются в монографиях, посвященных инженерной геологии территорий в пределах зон влияния сибирских водохранилищ. В опубликованной работе по Прибайкалью представлены материалы лабораторного изучения физико-механических свойств грунтов метаморфической, интрузивной и осадочной (юрские песчаники и алевролиты) формаций [9], позднее появились работы по скальным грунтам южных районов Хабаровского края, Монголии и юга Восточной Сибири [10–12].

С появлением нового объекта исследований, связанных с оценкой инженерно-геологических условий в районе Албазинского месторождения твердых полезных ископаемых на севере Хабаровского края, задача изучения скальных грунтов заняла одно из ведущих мест в планах работ Лаборатории инженерной геологии и геоэкологии Института земной коры СО РАН (г. Иркутск), при этом была разработана и реализована комплексная методическая схема.

В качестве небольшого отступления обратимся к некоторым событиям. Известно, что в 1984 г. под редакцией Е. М. Сергеева было опубликовано методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород (скальных грунтов), в котором кратко описаны оптический, электронно-микроскопический и ультразвуковой методы их изучения². С помо-

¹ Ломтадзе В. Д. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых: учебник для вузов. Л.: Недра, 1986. 272 с.

² Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород / под ред. Е. М. Сергеева. В 2 т. Т. 2. Лабораторные методы. М.: Недра, 1984. 438 с.



щью оптического метода (петрографические шлифы) определялись структуры и текстуры, минеральный состав, следы деформаций отдельных кристаллов, в эффузивах – количество порфировых включений. Электронно-микроскопический метод (просвечивающий электронный микроскоп, растровый электронный микроскоп) позволял при больших увеличениях исследовать детали строения скального грунта. С помощью ультразвукового метода (метод прозвучивания образца) измерялась скорость распространения упругих продольных сейсмических волн, изменения которой определялись различными факторами – особенностями структуры и текстуры, характером контактов между зернами, минеральным составом и другими. Но указанное пособие появилось почти сорок лет назад. Тем не менее совсем недавно, а именно 26 мая 2022 г., на заседании диссертационного совета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова состоялась защита докторской диссертации «Формирование инженерно-геологических особенностей гидротермально-метасоматических пород (на примере Курило-Камчатской вулканической дуги)» Юлии Владимировны Фроловой по специальности 1.6.7 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение». Кстати, научным руководителем кандидатской диссертации соискателя была профессор Московского государственного университета Галина Андреевна Голодковская – одна из первых исследователей инженерно-геологических особенностей скальных грунтов [13, 14].

Таким образом, в настоящее время специалисты «повернулись лицом» к проблеме инженерной геологии скальных грунтов и их массивов.

Материалы и методы исследования

В рамках представленного исследования объектом изучения явились скальные грунты Албазинского месторождения на севере Хабаровского края. На первом этапе исследований проводилось составление коллекции образцов различных петрографических типов грунтов определенных геологических формаций, которые отбирались из бортов карьера,

далее выполнялся комплекс лабораторных работ по разработанной методической схеме.

В ходе данной работы для анализа скальных грунтов был выбран тот же путь, что представлен в пособии 1984 г., только главную роль в нем исполнял классический оптический метод, а для определения «сейсмической скорости» (условное название скорости распространения продольной сейсмической волны в образце V_p , м/с) применялся специальный прибор, а также два метода прозвучивания – поверхностное и сквозное. Кроме «сейсмической скорости» авторами определялись пределы прочности образца (сжатие и растяжение), его плотность и степень водопоглощения. Совмещение указанной информации позволяет применить программу кластерного анализа для количественной оценки взаимосвязей между изученными признаками в рамках составленной коллекции, которая представляет основные петрографические типы скальных грунтов геологических формаций Албазинского месторождения. Остается добавить, что в настоящее время при инженерно-геологических изысканиях или специальных тематических работах обычно отсутствует первый пункт указанной методической схемы – изготовление, описание, фото и анализ петрографических шлифов.

В Институте земной коры СО РАН выполнялось визуальное описание образцов коллекции (№ 1–15); в специальной мастерской из каждого образца изготавливались шлифы, осуществлялось их описание, фотографирование и проводился детальный анализ различных признаков и особенностей. Затем с помощью прибора «Пульсар-2.2: измерение времени и скорости распространения ультразвука» в образцах измерялись скорости распространения продольных сейсмических волн («сейсмическая скорость» V_p , м/с). Авторами применялись два способа – поверхностное и сквозное прозвучивание образца для определения «сейсмической скорости» V_{p1} и V_{p2} соответственно, при этом измерялось время прохождения ультразвука T , мкс, а также расстояние между датчиками (база) L , мм. Далее проводился расчет «сейсмической скорости» V_p по формуле $V_p = L / T$. С использованием программы кластерного анализа, которая



давно и достаточно часто применяется в рамках грунтоведческих исследований в Лаборатории инженерной геологии и геоэкологии [15–18], на основе матрицы данных по сейсмическим, прочностным и физическим свойствам в программе Microsoft Excel были построены графики-дендрограммы для оценки уровня их взаимосвязей.

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете (г. Иркутск) по стандартной методике для некоторых образцов коллекции определялись пределы прочности при вертикальном сжатии R_c , МПа, и растяжении R_z , МПа. Для каждого образца вырезались шесть образцов-брусочков, для которых определялись прочность на сжатие и растяжение, среднее значение и пределы изменения. Например, для образца № 10 (туфогенный песчаник) $R_c = 101$ МПа (среднее значение), пределы изменений – 84–121 МПа; $R_z = 24$ МПа (среднее значение), пределы изменений – 20–29 МПа. Кроме того, по стандартным методикам измерены природная плотность $P_{пр}$, г/см³, и водопоглощение $W_{вп}$, %; для образцов № 1 и 5, № 3 и 6 дополнительно определены плотность минеральной части P_s , г/см³, и пористость n , %.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенного исследования авторами была дана инженерно-геологическая характеристика скальных грунтов по материалам коллекции, в которой представлены образцы различных петрографических типов пород (скальных грунтов) определенных геологических формаций, распространенных в районе месторождения. В геологическом разрезе они присутствуют в составе двух структурных этажей. Нижний этаж представлен нижнеюрской метаморфической формацией (метапесчаники, сланцы, метасоматиты), верхний – эффузивной формацией нижнего мела – поздней юры (андезиты, андезиты-базальты, базальты, дациты, спилиты) и интрузивной формацией нижнего мела (гранодиориты, гранит-порфиры).

Коллекция образцов скальных грунтов не предназначена для статистических обобщений, поскольку при помощи нее решается дру-

гая задача – на примере представителей перечисленных геологических формаций в соответствии с предложенной методической схемой собрать следующую информацию: визуальное описание образцов; изготовление и описание петрографических шлифов (исследуются текстурно-структурные особенности, минеральный состав и признаки процессов метаморфизма); измерение методами поверхностного и сквозного прозвучивания «сейсмической скорости» (V_{p1} и V_{p2} , м/с, соответственно); определение прочности при вертикальном сжатии R_c , МПа, и растяжении R_z , МПа; определение природной плотности $P_{пр}$, г/см³, и водопоглощения $W_{вп}$, %.

На основе полученной информации выполняется сравнительный анализ образцов с различными значениями «сейсмической скорости» и прочности, выясняются причины этих различий, а также проводится количественная оценка взаимосвязей показателей с помощью программы кластерного анализа.

Сравнительный анализ образцов № 1 и 5. Образец № 1 – дацитовый порфир (эффузивная формация нижнего мела – поздней юры). Шлиф представлен на рис. 1. Структура образца порфировая, преобладают зерна размером 0,1–0,25 мм, порфиры достигают 0,6–4 мм; текстура пятнистая. Минеральный состав образца имеет следующий вид: главные компоненты – плагиоклазы (39 %), кварц (18 %), калишпаты (19 %); второстепенные – кальцит (11 %), серицит (10 %), рудные (3 %). Основная масса скрытокристаллическая (фельзитовая), имеются крупные порфировые включения полевых шпатов и кварца, отмечаются признаки аллотриаморфной структуры (минералы не имеют кристаллографических четких очертаний). Полевые шпаты интенсивно кальцитизированы, серицитизированы. Кварц-полевошпатовые фельзитовые и аллотриаморфные агрегаты располагаются неравномерно: мелкие зерна реликтового рудного минерала замещены лейкоксом. Слабо развиты признаки процессов катаклаза; признаки бластогенеза (перекристаллизация в твердом состоянии) проявлены в виде серицитизации и кальцитизации.

С целью измерения «сейсмической скорости» V_{p2} проведено сквозное прозвучивание.

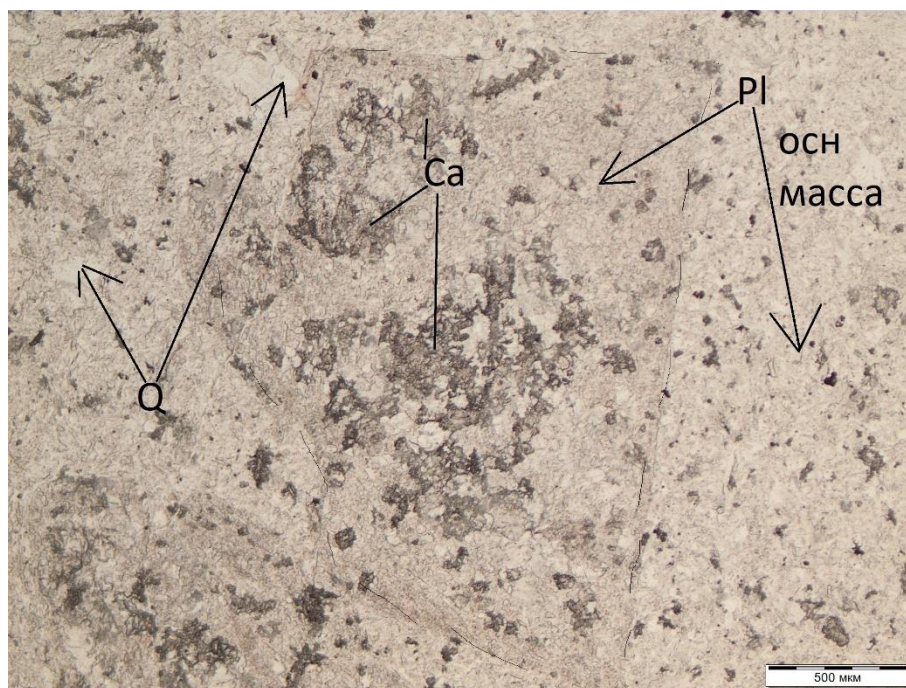


Рис. 1. Образец № 1 – дацитовый порфир
Fig. 1. Sample no. 1 – dacite porphyry

При $T = 13,8$ мкс и $L = 52$ мм $V_{p2} = 3768$ м/с.
При $T = 10,8$ мкс и $L = 45$ мм $V_{p2} = 4166$ м/с.
Среднее значение $V_{p2} = 4070$ м/с ($n = 2$ %).

Показатели физических свойств имеют следующие значения: $P_{np} = 2,65$ г/см³; $P_s = 2,69$ г/см³; $n = 1,4$ %; $W_{en} = 0,53$ %.

Образец № 5 – метапесчаник (метаморфическая формация нижней юры). Шлиф представлен на рис. 2. Структура псаммитовая, размер зерен – 0,1–0,7 мм, цемент глинистый, базальный и базально-поровый (до 16 %); текстура неясно ориентированная. Минеральный состав образца имеет следующий вид: основные компоненты – полевые шпаты (38 %), кварц (18 %); второстепенные – кальцит, рудные, биотит, серицит. Зерна минералов корродированные, угловатые, края изъедены глинистым цементом; встречаются деформированные и хлоритизированные обломки биотита; межзерновые пространства заполняют ксеноморфные формы рудного минерала, по микротрещинкам наблюдается ксеноморфный кальцит. Кроме указанных минералов в образце в большом количестве присутствуют обломки пород (до 29 %) – алевролиты, дациты, аргиллиты. Влияние метаморфизма проявляется в виде окварцевания и кальцитизации; отмечаются признаки влияния дислокационного метаморфизма – обломки кварца

сдавлены, имеют волнистое погасание, кроме того, пористость грунта ничтожна – 0,2 %, водопоглощение, соответственно, 0,1 %. Интенсивного раздробления зерен (кластогенный процесс) не наблюдается.

С целью измерения «сейсмической скорости» V_{p2} и V_{p1} выполнены сквозное и поверхностное прозвучивания. В первом случае V_{p1} составила 4800 и 5000 м/с; среднее значение – 4900 м/с. Во втором случае получены следующие результаты: при $T = 19,6$ мкс и $L = 120$ мм $V_{p1} = 6122$ м/с; при $T = 21,1$ мкс и $L = 120$ мм $V_{p1} = 5970$ м/с; при $T = 19,7$ мкс и $L = 120$ мм $V_{p1} = 6091$ м/с; среднее значение: $V_{p1} = 6061$ м/с.

Показатели физических свойств имеют следующие значения: $P_{np} = 2,65$ г/см³; $P_s = 2,68$ г/см³; $n = 0,2$ %; $W_{en} = 0,1$ %.

При поверхностном прозвучивании «сейсмическая скорость» оказалась больше, чем при сквозном: считается коэффициент анизотропии – $K^1_{ан} = V_{p1} / V_{p2} = 6061 / 4900 = 1,24$.

Из практики замеров «сейсмической скорости» как в скальных обнажениях, так и в достаточно больших образцах известно, что поверхностное прозвучивание представляет более надежные результаты по сравнению со способом сквозного измерения. По данным коллекции (образцы № 5–11) зафиксированы

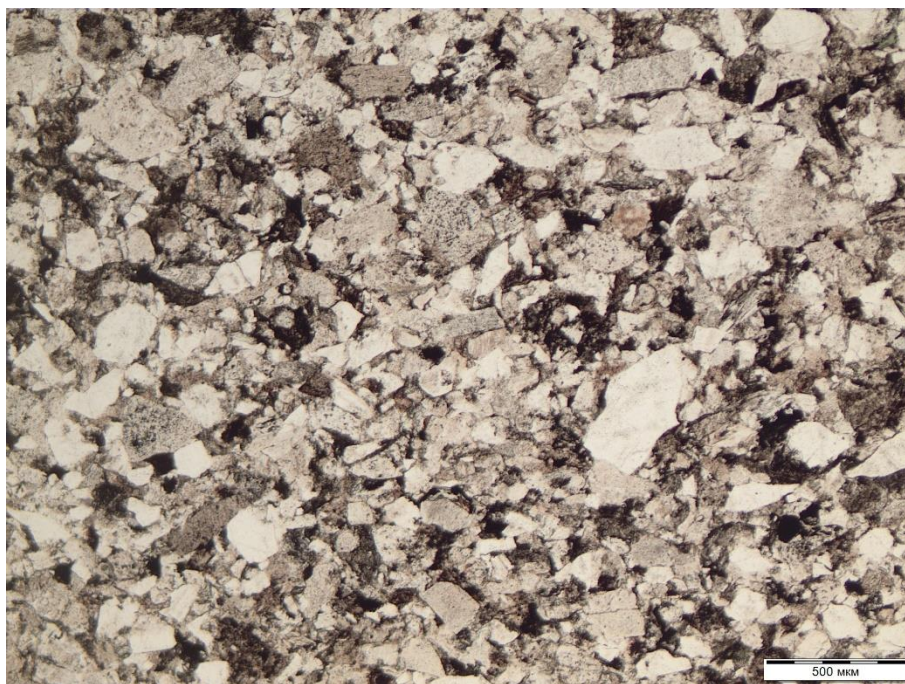


Рис. 2. Образец № 5 – метапесчаник
Fig. 2. Sample no. 5 – metasandstone

коэффициенты анизотропии $K_{ан}^I = 1,13–1,24$. Почему при поверхностном прозвучивании «сейсмическая скорость» возрастает? Наши предположения заключаются в следующем. Вероятнее всего, в процессе поверхностного прозвучивания при прохождении сейсмической волны участвует вся масса образца. При сквозном прозвучивании волна пробегает определенный путь, где можно встретить различные «отрицательные особенности» (своеобразные препятствия) – микротрещинки, вторичные образования, «порфиры», деформированные зерна или кристаллы, что способствует снижению измеряемой «скорости». Кроме того, анизотропия скорости распространения продольной сейсмической волны зависит от наличия в образце слоистости – измерения, выполненные параллельно слоистости (или трещине), увеличивают «сейсмическую скорость» как при сквозном, так и поверхностном прозвучивании.

Результаты сравнительного анализа лабораторных исследований образцов № 1 и 5 заключаются в следующем. При сопоставлении установлено, что скорость распространения продольных сейсмических волн («сейсмическая скорость») в метапесчанике (образец № 5) оказалась выше (максимальное значение – 6061 м/с) по сравнению с аналогичной скоро-

стью в даците (образец № 1, максимальное значение – 4070 м/с). Плотность этих образцов почти не различается (2,65–2,69 г/см³), но имеются четкие различия по пористости: в даците – 1,4 %, в песчанике – 0,2 %. Можно предположить, что пористость в скальных грунтах имеет большее влияние на сейсмические свойства, чем их плотность, поскольку она связана с признаками, которые можно установить только на микроуровне (в шлифе).

В отчете Института горного дела ДВО РАН (г. Хабаровск) от 2021 г. по результатам статистической обработки данных о пористости шести петрографических типов скальных грунтов месторождения Албазино (Албазинское) отмечалась наибольшая степень ее изменчивости – коэффициент вариации достигает в ряде случаев 88–94 % (для плотности этот показатель составляет менее 3 %). Возможно, появление образцов с повышенными значениями пористости связано с некоторым разуплотнением, также причина может крыться в петрографической информации, которая в отчете отсутствует. Именно эта информация имеется для образцов № 1 (эффузивная формация) и № 5 (метаморфическая формация).

Даци́т (образец № 1) имеет порфировую (разнородную) структуру и пятнистую текстуру,



среди главных минералов преобладают плагиоклазы и калишпаты (в сумме 58 %), присутствуют неравномерно распределенные кварц-полевошпатовые фельзитовые агрегаты в скрытокристаллической массе; отмечаются признаки процессов бластогенеза (перекристаллизация в твердом состоянии) в виде кальцитизации – серицитизации и слабого дислокационного метаморфизма (иногда отмечается микротрещиноватость зерен); пористость – 1,4 %. Перечисленные признаки явились причиной пониженной «сейсмической скорости»: $V_{p2} = 4070$ м/с.

Метапесчаник (образец № 5) имеет псаммитовую (однородную) структуру, среди главных минералов присутствуют серицитизированные плагиоклазы и пелитизированные калишпаты, много обломков пород; имеются сдавленные зерна кварца (для них характерно волнистое погасание) и деформированные зерна биотита, что связано с интенсивным влиянием высокого давления; при метаморфизме проявлено окварцевание и кальцитизация; пористость – 0,2 %. Перечисленные признаки явились причиной повышенной «сейсмической скорости»: $V_{p1} = 6061$ м/с.

Таким образом, главные причины указанных различий по сейсмическим свойствам связаны с признаками структуры и текстуры, состава, процессами кластогенеза и бластогенеза (образцы № 1, 5).

Сравнительный анализ образцов № 3 и 6. Образец № 3 – метапесчаник (метаморфическая формация нижней юры). Шлиф представлен на рис. 3. Структура метапесчаника псаммитовая мелкозернистая (0,1–0,25 мм); текстура неясно ориентированная. Минеральный состав образца имеет следующий вид: главные компоненты – полевые шпаты (32 %), кварц (16 %); второстепенные – биотит (3 %), серицит (4 %), кальцит (4 %), рудные (5 %); акцессорные – циркон, лейкоксен (единичные зерна); вторичные – хлорит, серицит, кальцит, гидроокислы железа, кварц. Среди зерен в метапесчанике встречается большое количество обломков пород (до 30 %), представленных аргиллитом, алевролитом, гранитоидами, эффузивами кислого состава. Цемент метапесчаника глинистый базально-поровый (около 20 %); обломки угловатые, по краям и

по трещинам изъедены глинистым цементом. Зерна полевых шпатов трещиноватые, при этом плагиоклазы серицитизированы, калишпаты интенсивно пелитизированы. Обломки биотита деформированы (смяты), частично хлоритизированы. Рудные заполняют микро-трещинки, в виде мелких зерен присутствуют среди основной массы. В порах между обломками отмечается ксеноморфный кальцит. Метапесчаник интенсивно катаклазирован, микротрещинки заполнены гидроокислами железа. Метагенетические изменения в песчанике проявлены в виде катаклаза, серицитизации, кальцитизации и окварцевания (прожилки кварца – 0,03 мм).

Измерение «сейсмической скорости» V_{p2} выполнено в одном варианте сквозного прозвучивания. При $T = 11,3$ мкс и $L = 47$ мм $V_{p2} = 4159$ м/с.

Показатели физических свойств имеют следующие значения: $P_{np} = 2,65$ г/см³; $P_s = 2,71$ г/см³; $n = 2,2$ %; $W_{sn} = 0,82$ %.

Образец № 6 – метапесчаник (метаморфическая формация нижней юры). Шлиф представлен на рис. 4. Структура метапесчаника псаммитовая мелкозернистая (0,1–0,25 мм); текстура неясно ориентированная. Минеральный состав образца имеет следующий вид: главные компоненты – полевые шпаты (32 %), кварц (16 %); второстепенные – биотит (3 %), серицит (4 %), кальцит (4 %), рудные (5 %); акцессорные – циркон, лейкоксен (единичные зерна); вторичные – хлорит, серицит, кальцит, гидроокислы железа, кварц. Среди зерен в метапесчанике встречается большое количество обломков пород (до 30 %), представленных аргиллитом, алевролитом, гранитоидами, эффузивами кислого состава. Цемент метапесчаника глинистый базально-поровый (около 20 %); обломки угловатые, по краям и по трещинам изъедены глинистым цементом. Зерна полевых шпатов трещиноватые, при этом плагиоклазы серицитизированы, калишпаты интенсивно пелитизированы. Обломки биотита деформированы (смяты), частично хлоритизированы. Рудные заполняют микро-трещинки, в виде мелких зерен присутствуют среди основной массы. В порах между обломками отмечается ксеноморфный кальцит. Метапесчаник интенсивно катаклазирован, мик-



ротрешинки заполнены гидроокислами железа. Метагенетические изменения в песчанике проявлены в виде катаклаза, серицитизации, кальцитизации и окварцевания (прожилки кварца – 0,03 мм).

Измерение «сейсмической скорости» V_{p1} выполнено в варианте поверхностного прозвучивания. При $T = 12,2$ мкс и $L = 53$ мм $V_{p1} = 4300$ м/с. При $T = 20,5$ мкс и $L = 78$ мм $V_{p1} =$

3800 м/с. При $T = 12,9$ мкс и $L = 56$ мм $V_{p1} = 4300$ м/с. Рассчитывается среднее значение $V_{p1} = 4133$ м/с ($n = 3$ %).

Показатели физических свойств имеют следующие значения: $P_{np} = 2,72$ г/см³; $P_s = 2,75$ г/см³; $n = 1,2$ %; $W_{вп} = 0,43$ %.

Результаты сравнительного анализа лабораторных исследований образцов № 3 и 6 заключаются в следующем. При сопоставлении

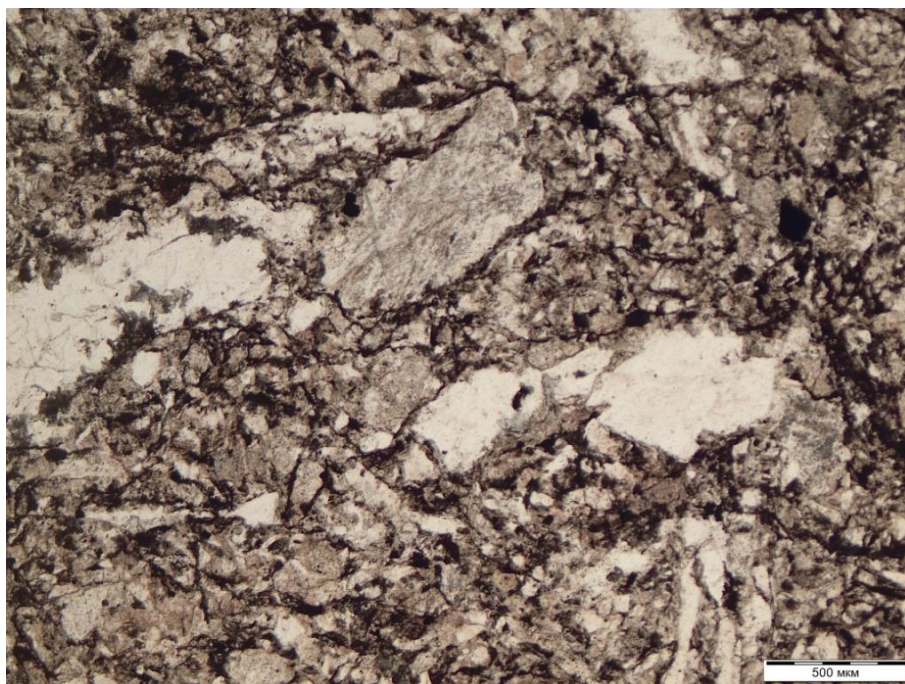


Рис. 3. Образец № 3 – метапесчаник
Fig. 3. Sample no. 3 – metasandstone



Рис. 4. Образец № 6 – метапесчаник
Fig. 4. Sample no. 6 – metasandstone



образцов установлено, что они характеризуются пониженными значениями «сейсмической скорости» ($V_{p2} = 4159$, $V_{p1} = 4133$ м/с), при этом оба образца представлены метапесчаниками с относительно однородной псаммитовой средне-мелкозернистой структурой. В то же время на микроуровне (шлифы) выявлено, что исследованные метапесчаники интенсивно катаклазированы (см. рис. 3 – образец № 3, рис. 4 – образец № 6). Таким образом, в данном примере четко выражено влияние на сейсмические свойства скальных грунтов процессов катаклаза, структура отступает на второй план.

Сравнительный анализ образцов № 9 и 11. В кратком варианте выполнен сравнительный анализ образцов № 9 (андезитовый порфирит) и № 11 (метасоматит). В первом случае (андезитовый порфирит) «сейсмическая скорость» $V_{p1} = 5192$, $V_{p2} = 4393$ м/с, во втором (метасоматит) – соответственно 4197 и 3513 м/с. Для этой пары имеются данные по прочности: андезитовый порфирит характеризуется повышенной прочностью при сжатии и растяжении (101–24 МПа), метасоматит – пониженной (40–7 МПа). Причиной различий также являются признаки, установленные на микроуровне. Повышенные показатели «сейсмической скорости» и прочности андезитового порфирита можно объяснить слабым развитием процессов катаклаза и одновременно относительно однородной реликтовой порфириковой структурой; пониженные показатели «сейсмической скорости» и прочности ме-

тасамотита, вероятнее всего, связаны с разнородным минеральным составом (главные минералы – хлорит, рудные, кальцит, кварц, руksит) и характерной метасоматической (вторичной) катаклазированной структурой.

Оценка взаимосвязей показателей сейсмических, прочностных, физических свойств скальных грунтов (программа кластерного анализа R-типа). Оценка взаимосвязей показателей указанных свойств скальных грунтов коллекции проводилась на примере группы из шести образцов, для которых определялись пределы и средние значения прочности на вертикальное сжатие (R_c , МПа) и растяжение (R_z , МПа), средние значения «сейсмической скорости» (V_{p1} , V_{p2} м/с), а также природная плотность (P_{np} , г/см³) для конкретного образца.

В таблице представлена матрица данных, с помощью которой в программе Microsoft Excel были построены различные варианты графиков-дендрограмм по программе кластерного анализа R-типа. Каждый образец таблицы представлен петрографическим типом породы (грунта): 9 – андезитовый порфирит, 10 – туфогенный песчаник, 11 – метасоматит, 12 – андезитовый порфирит, 13 – андезит, 14 – спилит.

Оценка взаимосвязей между показателями оценивается по коэффициенту корреляции (горизонтальная ось на графике-дендрограмме): при коэффициенте более 0,7 связи между показателями и кластерами (группами различных показателей) считаются существен-

Прочность, «сейсмическая скорость» и плотность скальных грунтов (коллекция, образцы № 9–14)

Strength, “seismic velocity” and density of rocky soils (collection, samples no. 9–14)

Номер образца (коллекция)	Показатель						
	R_c (пп)	R_c (ср), $n = 6$	R_z (пп)	R_z (ср), $n = 6$	V_{p1} (ср)	V_{p2} (ср)	P_{np}
9	93–121	101	20–29	24	5192	4393	2,9
10	93–133	115	15–36	31	5560	4627	2,58
11	34–49	41	5–8	7	4197	3513	3,5
12	71–117	93	11–31	19	4554	4002	2,58
13	59–107	86	15–24	19	4734	4552	2,5
14	53–102	67	9–20	14	5370	5512	2,96

Примечание. R_c , R_z – прочность на сжатие и растяжение соответственно, МПа; V_{p1} , V_{p2} – «сейсмическая скорость» при поверхностном и сквозном прозвучивании соответственно, м/с; P_{np} – природная плотность для конкретного образца, г/см³; n – пористость, %. $Пр$ – пределы изменений, $ср$ – средние значения.

Note. R_c , R_z – compressive and tensile strength, respectively, MPa; V_{p1} , V_{p2} – “seismic velocity” at surface and through sounding, respectively, m/s; P_{np} – natural density for a particular sample, g/cm³; n – porosity, %. Pr – variation limits, $ср$ – average values.



ными, если коэффициент менее 0,4 – слабыми; при коэффициенте в пределах 0,4–0,7 связи среднего уровня (их можно назвать заметными).

Первый вариант графика включает средние значения прочности и «сейсмической скорости» (рис. 5).

Выделены два кластера признаков: первый включает очень тесно связанные показатели прочности (коэффициент корреляции близок к единице, тем не менее всегда $R_c > R_z$); второй объединяет «сейсмические скорости», но коэффициент корреляции между ними снижается до 0,8 (также соблюдается неравенство $V_{p1} > V_{p2}$). Связь между этими кластерами заметная, но не является существенной (коэффициент корреляции – 0,48).

При построении второго варианта графика в число признаков добавляется природная плотность (рис. 6).

Выделены два кластера признаков, которые между собой не имеют существенной связи (коэффициент корреляции – 0,3). Уровень взаимосвязи плотности и «сейсмической скорости» (второй кластер) – менее 0,7 (коэффициент корреляции – 0,62). Прочность (R_c , R_z) не имеет контактов с плотностью и «сейсмической скоростью» (коэффициент корреляции – 0,3). Значит, имеются другие факторы

воздействия, которые, вероятнее всего, существуют на микроуровне.

Кроме того, при использовании фондовых материалов по Албазинскому месторождению была также установлена «аномальная» зависимость, которая заключалась в том, что природная плотность скальных грунтов (метапесчаников и дацитов) не влияет существенно на их прочность, поскольку коэффициент корреляции между этими признаками – менее 0,4 (0,27) [19].

Аналогичная «аномалия» была выявлена при изучении протерозойских песчаников из района Удоканского месторождения, для которых ведущими факторами оказались особенности их структуры и текстуры, установленные при изучении петрографических шлифов [20].

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Оценка сейсмических свойств скальных грунтов (определение скорости распространения продольных сейсмических волн в образце методом прозвучивания – условное название «сейсмическая скорость») зависит от комплекса факторов, которые определяются многочисленными признаками петрографического

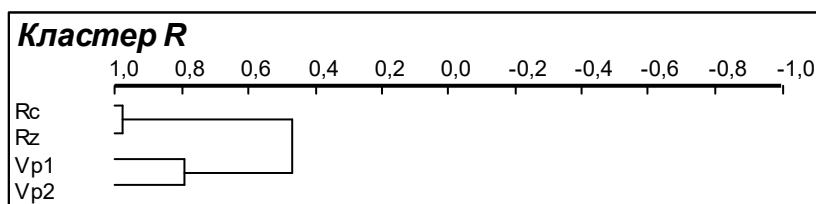


Рис. 5. Взаимосвязи прочности и «сейсмической скорости»

Горизонтальная ось – коэффициент корреляции

Fig. 5. Correlation of strength and “seismic velocity”

The horizontal axis is the correlation coefficient

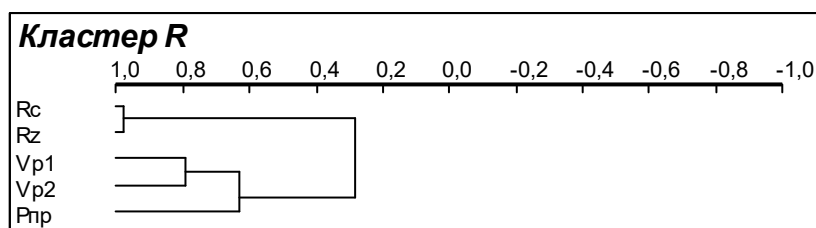


Рис. 6. Взаимосвязи прочности, «сейсмической скорости» и природной плотности

Горизонтальная ось – коэффициент корреляции

Fig. 6. Correlations of strength, “seismic velocity” and natural density

The horizontal axis is the correlation coefficient



характера в условиях разнообразного сочетания положительного и отрицательного влияния на величину сейсмического показателя. К этим признакам относятся типы структуры и текстуры, образование агрегатов различного состава, степень развития процессов катаклаза (дробление зерен и кристаллов) и бластогенеза (вторичные преобразования вещества в твердом состоянии), интенсивное сдавливание при дислокационном метаморфизме, особый состав главных минералов.

2. Главными факторами «сейсмической скорости» скальных грунтов, вероятнее всего, оказываются признаки, которые необходимо фиксировать на микроуровне (современное направление при инженерно-геологическом изучении скальных грунтов и скальных массивов). В нашем случае этот факт установлен при сравнении образцов с разнообразными

признаками, связанными с кластогенезом, бластогенезом и другими воздействиями метаморфических изменений, которые были установлены с помощью оптического метода.

3. Полученные результаты дают повод рекомендовать включить в методику инженерно-геологических и инженерно-сейсмологических исследований показатель «петрографический кластер». Следует отметить, что ввиду незначительного количества образцов, принадлежащих к одному объекту (месторождение Албазинское), полученные результаты являются предварительными, в связи с чем требуется дальнейшее продолжение испытаний, а также сопоставление и сравнительный анализ их результатов с результатами аналогичных исследований скальных петрографических разновидностей других регионов.

Список источников

1. Marinos P., Noek E. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2001. Vol. 60. Iss. 2. P. 85–92. <https://doi.org/10.1007/s100640000090>.
2. Aydan Ö., Ulusay R., Tokashiki N. Rock mass quality rating (RMQR) system and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses // *Engineering Geology for Society and Territory*. 2015. Vol. 6. P. 769–772. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09060-3_137.
3. Barton N. R., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support // *Rock Mechanics*. 1974. Vol. 6. Iss. 4. P. 189–236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>.
4. Noek E., Brown E. T. Practical estimates of rock mass strength // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1997. Vol. 34. Iss. 8. P. 1165–1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X).
5. Абатурова И. В. Оценка и прогноз инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых горно-складчатых областей. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. 226 с.
6. Фролова Ю. В. Современные подходы к изучению скальных грунтов и их массивов (обзор по материалам XII Конгресса МАИГ-2014) // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология*. 2015. № 6. С. 553–560.
7. Ладыгин В. М., Фролова Ю. В., Спиридонов Э. М. Формирование физико-механических свойств эффузивных пород // *Инженерная геология*. 2016. № 3. С. 36–45.
8. Ладыгин В. М., Фролова Ю. В., Спиридонов Э. М. О явлении аномально низких значений скоростей продольных волн современных базальтоидов // *Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр»*. Серия: Науки о земле. 2018. № 1. С. 20–31.
9. Инженерная геология Прибайкалья / отв. ред. Г. Б. Пальшин. М.: Наука, 1968. 186 с.
10. Даммер А. Э., Квашук С. В. Инженерно-геологические условия южной части Хабаровского края: монография. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2001. 121 с.
11. Рященко Т. Г., Данилова Т. Ф., Нетесова Г. Е., Малышева Л. В., Акулова В. В. Инженерно-геологическая оценка мезо-кайнозойских отложений (Восточная Сибирь и Монголия). Новосибирск: Наука, 1992. 118 с.
12. Рященко Т. Г., Акулова В. В. Грунты юга Восточной Сибири и Монголии: монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. 154 с.
13. Голодковская Г. А. Изучение геологических формаций при региональных инженерно-геологических исследованиях // *Советская геология*. 1964. № 8. С. 149–156.
14. Фролова Ю. В., Голодковская Г. А., Ладыгин В. М., Рычагов С. Н. О природе инженерно-геологических свойств гидротермально-метасоматических пород Курило-Камчатского региона // *Вестник Московского университета*. Серия 4. Геология. 1999. № 3. С. 36–42.
15. Рященко Т. Г. Опыт применения кластер-анализа при инженерно-геологических исследованиях // *Инженерная геология*. 1980. № 3. С. 108–114.
16. Данилов Б. С. Кластерный анализ в EXCEL // *Строение литосферы и геодинамика: материалы науч. конф.* Иркутск, 2001. С. 18–19.
17. Рященко Т. Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь): монография. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2010. 287 с.
18. Рященко Т. Г., Вашестюк Ю. В., Гринь Н. Н. Метод



«Микроструктура» в практике региональных инженерно-геологических исследований лессовых и глинистых грунтов. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2021. 130 с.

19. Рященко Т. Г., Маслов Е. А. Опыт инженерно-геологической оценки скальных грунтов (Албазинское месторождение на севере Хабаровского края) // Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии:

труды Междунар. науч. конф. М., 2021. С. 268–272.

20. Рященко Т. Г., Тирских С. А., Корнилова Т. А., Брыжак Е. В. Комплексная инженерно-геологическая оценка протерозойских песчаников (строительная площадка в районе Удокана) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2015. № 3. С. 51–58. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2015-3-51-58>.

References

1. Marinos P., Noek E. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2001;60(2):85-92. <https://doi.org/10.1007/s100640000090>.

2. Aydan Ö., Ulusay R., Tokashiki N. Rock mass quality rating (RMQR) system and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses. *Engineering Geology for Society and Territory*. 2015;6:769-772. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09060-3_137.

3. Barton N. R., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. 1974;6(4):189-236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>.

4. Noek E., Brown E. T. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1997;34(8):1165-1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X).

5. Abaturova I. V. *Evaluation and forecast of engineering-geological conditions of solid mineral deposits in folded mountain areas*. Ekaterinburg: Ural State Mining University; 2011. 226 p. (In Russ.).

6. Frolova Yu. V. Current approaches to the study of rock mechanics and rock massifs (overview of XII IAEG congress proceedings). *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2015;6:553-560. (In Russ.).

7. Ladygin V. M., Frolova Yu. V., Spiridonov E. M. Formation of physical mechanical properties of effusive rocks. *Inzhenernaya geologiya = Engineering Geology World*. 2016;3:36-45. (In Russ.).

8. Ladygin V. M., Frolova J. V., Spiridonov E. M. Abnormally low velocity values of longitudinal waves in modern basaltoids. *Vestnik Kamchatskoy regional'noy assotsiatsii "Uchebno-nauchnyy tsentr". Seriya: Nauki o Zemle = Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences*. 2018;1:20-31.

9. Pal'shin G. B. *Engineering geology of the Baikal region*. Moscow: Nauka; 1968. 186 p. (In Russ.).

10. Dammer A. E., Kvashuk S. V. *Geotechnical conditions of the southern part of the Khabarovsk Territory*. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2001. 121 p. (In Russ.).

11. Ryashchenko T. G., Danilova T. F., Netesova G. E., Malysheva L. V., Akulova V. V. *Geotechnical assessment of Meso-Cenozoic deposits (Eastern Siberia and Mongolia)*. Novosibirsk: Nauka; 1992. 118 p. (In Russ.).

12. Ryashchenko T. G., Akulova V. V. *Soils of the south of Eastern Siberia and Mongolia*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 1998. 154 p. (In Russ.).

13. Golodkovskaya G. A. Study of geological formations in regional engineering and geological studies. *Sovetskaya geologiya*. 1964;8:149-156. (In Russ.).

14. Frolova Yu. V., Golodkovskaya G. A., Ladygin V. M., Rychagov S. N. On the nature of engineering-geological properties of hydrothermal metasomatic rocks of the Kurils-Kamchatka region. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya = Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 1999;3:36-42. (In Russ.).

15. Ryashchenko T. G. Cluster analysis experience in the engineering and geological research. *Inzhenernaya geologiya = Engineering Geology World*. 1980;3:108-114. (In Russ.).

16. Danilov B. S. Cluster analysis in EXCEL. In: *Stroenie litosfery i geodinamika: materialy nauch. konf. = Lithospheric structure and geodynamics: proceedings of the scientific conference*. Irkutsk; 2001, p. 18–19. (In Russ.).

17. Ryashchenko T. G. *Regional soil science (Eastern Siberia)*. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2010. 287 p. (In Russ.).

18. Ryashchenko T. G., Vashestyuk Yu. V., Grin' N. N. *Microstructure method in practical regional engineering and geological studies of loess and clay soils*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2021. 130 p. (In Russ.).

19. Ryashchenko T. G., Maslov E. A. The experience of engineering and geological assessment of rocky soils (Albazinskoye deposit in the north of the Khabarovsk region). *Novye idei i teoreticheskie aspekty inzhenernoi geologii: trudy Mezhdunar. nauch. konf. = New ideas and theoretical aspects of engineering geology: proceedings of the International scientific conference*. Moscow; 2021, p. 268–272. (In Russ.).

20. Ryashchenko T. G., Tyrshih S. A., Kornilova T. A., Bryzhak E. V. Integrated engineering geological evaluation of Proterozoic sandstones: a case study of the construction site near the town of Udokan. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka = Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2015;(3):51-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2015-3-51-58>.



Информация об авторах / Information about the authors



Рященко Тамара Гурьевна,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник Лаборатории инженерной геологии и геоэкологии,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
ryashenk@crust.irk.ru.
Tamara G. Ryashchenko,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Leading Researcher at the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
ryashenk@crust.irk.ru.



Маслов Егор Александрович,
аспирант,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
MaslovEA@polymetal.ru.
Egor A. Maslov,
Postgraduate Student,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
MaslovEA@polymetal.ru.



Брыжак Евгений Вадимович,
кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий Лабораторией инженерной сейсмологии и сейсмогеологии,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
bryzhak@crust.irk.ru.
Evgeny V. Bryzhak,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Engineering Seismology and Seismogeology,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
bryzhak@crust.irk.ru.



Корнилова Татьяна Александровна,
ведущий инженер Лаборатории геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
kornilova@crust.irk.ru.
Tatiana A. Kornilova,
Leading Engineer of the Laboratory of Oil and Gas Geology,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
kornilova@crust.irk.ru.



Вашестюк Юлия Владимировна,
кандидат геолого-минералогических наук,
доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
vashestyuk_yv@istu.edu.



Yulia V. Vashestyuk,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Associate Professor at the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
vashestyuk_yv@istu.edu.



Болотнев Александр Юрьевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых,
технический руководитель Лаборатории геомеханики и физики горных пород,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
abolotnev@mail.ru.
Alexander Yu. Bolotnev,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Mineral Deposit Development,
Technical Director at the Laboratory of Geomechanics and Rock Physics,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
abolotnev@mail.ru.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

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 25.03.2022; одобрена после рецензирования 28.04.2022; принята к публикации 30.05.2022.

The article was submitted 25.03.2022; approved after reviewing 28.04.2022; accepted for publication 30.05.2022.