



ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ И ПРОДУКТОВ ИХ РАЗЛОМНЫХ ЗОН (АЛБАЗИНСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ, СЕВЕР ХАБАРОВСКОГО КРАЯ)

Т.Г. РЯЩЕНКО*, Е.А. МАСЛОВ, Е.В. БРЫЖАК, С.И. ШТЕЛЬМАХ

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия
128, ул. Лермонтова, г. Иркутск 664033, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются результаты инженерно-геологического изучения скальных грунтов и продуктов их разломных зон на примере коллекции образцов, отобранных в бортах карьера Албазинского золотоносного месторождения, расположенного на севере Хабаровского края.

Цель. Разработка и реализация методической схемы, которая включает лабораторные определения в образце скального грунта скорости распространения продольных сейсмических волн («сейсмической скорости») с помощью прибора «Пульсар-2.2» (методы сплошного и сквозного прозвучивания), плотности, пористости и водопоглощения, а также информацию о типах микроструктуры и микротекстуры, минеральном составе и признаках изменений при воздействии метаморфизма (петрографические шлифы).

Материалы и методы. Для образцов коллекции скальных грунтов выполняется оценка взаимосвязи «сейсмической скорости» с показателями физических свойств (программа кластерного анализа R-типа). Продукты разломных зон изучались в лаборатории по специальной методической схеме — расширенной (черная глина) и сокращенной (щебенисто-дресвяные образования); впервые определялся микроэлементный состав глины и дресвы аргиллитов, оценивался уровень их загрязнения токсичными микроэлементами (показатель Zc).

Результаты. На основании количественной оценки взаимосвязи показателей различных свойств скальных грунтов, выявленной с помощью программы кластерного анализа, получен «аномальный» вывод об отсутствии влияния плотности скального грунта на сейсмические свойства, что можно объяснить текстурно-структурными особенностями, минеральным составом и последствиями метаморфизма — признаками катаклаза и бластогенеза (фиксируются на микроуровне — в шлифе).

Заключение. Предложенные методические схемы можно рекомендовать для дальнейших исследований сейсмических, прочностных и физических свойств скальных грунтов при сейсмологических и инженерно-сейсмологических исследованиях различных территорий.

Ключевые слова: скальный грунт, сейсмические и физические свойства, шлиф, кластерный анализ, глина, щебенисто-дресвяный грунт

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: в работе задействовано оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682.

Для цитирования: Рященко Т.Г., Маслов Е.А., Брыжак Е.В., Штельмах С.И. Инженерно-геологическое изучение скальных грунтов и продуктов их разломных зон (Албазинское месторождение, север Хабаровского края). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2022;64(2):68—79. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-2-68-79>

Статья поступила в редакцию 23.06.2021

Принята к публикации 05.09.2022

Опубликована 15.09.2022

* Автор, ответственный за переписку

Proceedings of higher educational establishments
Geology and Exploration
2022;64(2):68—79

AN ENGINEERING-GEOLOGICAL STUDY OF ROCK SOILS AND THE PRODUCTS OF THEIR FRACTURE ZONES (ALBAZINSKOE DEPOSIT, NORTH Khabarovsk KRAI)

TAMARA G. RYASHCHENKO*, EGOR A. MASLOV, EVGENY V. BRYZHAK, SVETLANA I. SHTEL'MAKH

*Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia
128, Lermontov str., Irkutsk 664033, Russia*

ABSTRACT

Background. The results of an engineering-geological study of rock soils and the products of their fault zones are considered on the example of samples selected in the sides of the Albazinskoe gold-bearing deposit located in the north of the Khabarovsk Krai.

Aim. To develop and implement a methodological approach, which includes laboratory determinations of the velocity of propagation of longitudinal seismic waves ("seismic speed") using a "Pulsar-2.2" unit (methods of continuous and through sounding), as well as density, porosity and water absorption determinations along with obtaining information about the types of microstructure and microtexture, the mineral composition and mineral alteration features under the influence of metamorphism (using petrographical thin sections).

Materials and methods. For the collected rock soil samples the relationship between seismic velocity and physical properties indicators was evaluated (*R*-type cluster analysis programme). The products of fractural zones were studied in a laboratory according to a specially-developed methodological approach: extended (black clay) and reduced (crushed stone formations with debris). The microelement composition of the clay and gravel of argillites was determined for the first time, and the level of their pollution by toxic microelements (*Zc* index) was evaluated.

Results. On the basis of quantitative assessment of the relationship between indicators of rocky soils various properties identified using the cluster analysis program, an "anomalous" conclusion is obtained about the absence of the rock soil density effect on seismic properties, which can be explained by the textural and structural features, as well as by mineral composition and the consequences of metamorphism (cataclastic and blastogenetic features recorded on the microscale in thin sections).

Conclusion. The proposed methodological approach can be recommended for further studies of seismic, strength and physical properties of rocky soils during seismological and engineering-seismological studies of various territories.

Keywords: rock soil, seismic and physical properties, thin section, cluster analysis, clay, crushed stone soil with debris

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: The equipment of the Center for Collective Use "Geodynamics and Geochronology" of the Institute of the Earth's Crust of the SB RAS was used in this work within the framework of the grant No. 075-15-2021-682.

For citation: Ryashchenko T.G., Maslov E.A., Bryzhak E.V., Shtel'makh S.I. An engineering-geological study of rock soils and the products of their fracture zones (Albazinskoe deposit, north Khabarovsk Krai). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2022;64(2):68—79. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-2-68-79>

Manuscript received 23 June 2021

Accepted 5 September 2022

Published 15 September 2022

* Corresponding author

«Инженерная геология для общества и территорий» — главная идея XII Конгресса МАИГ (IAEG), который состоялся в сентябре 2014 года в Италии, Турин. В рамках проблемы «Скальные грунты» в программе конгресса выделены следующие научные направления: анализ

природы физико-механических свойств, трещиноватости и механизма разрушения; вопросы оценки свойств скальных массивов, для которых были предложены специальные индексы [1, 14]. Рекомендуется изучать зависимость физико-механических свойств грунтов от их структурно-минералогических особенностей, которые определяются на микроуровне (петрографические шлифы, РЭМ), а также количественные корреляционные взаимосвязи между различными показателями физико-механических свойств [13].

Следуя этим рекомендациям, на примере коллекции образцов скальных грунтов (дациты и метаморфизованные песчаники), отобранных из бортов карьера Албазинского месторождения на севере Хабаровского края и доставленных в Институт земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН), выполнены лабораторные работы по предложенной методической схеме и представлены в сокращенном варианте в трудах конференции «Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии» [11]. В настоящее время коллекция дополнена образцами двух типов, также отобранных в карьере Албазинского месторождения и представленных продуктами разломных зон, для которых использована специальная методическая схема лабораторных исследований дисперсных грунтов — расширенная для так называемой «глинки трения» (милониты) в виде черной глины (обр. № 1-а) и сокращенная для щебенисто-дресвяных образований (обр. № 2-а). В результате появилась «комбинированная» статья, посвященная инженерно-геологическому изучению скальных грунтов и продуктов их разломных зон. Кратко рассматриваются фондовые материалы по месторождению, затем выполняется описание объектов исследований — образцов коллекции скальных и дисперсных грунтов, представляются методические схемы их лабораторного изучения, приводятся результаты исследований и их обсуждение.

Албазинское месторождение расположено в пределах Ульбанской структурно-формационной зоны Сихотэ-Алинской складчатой области,

в которой выделяются три структурных этажа. Нижний представлен юрскими осадочными породами со следами метаморфизма (метапесчаники), средний — эффузивами порфировой формации (дациты, андезиты) среднемилового возраста, верхний — четвертичными отложениями. Рельеф территории низкогорный (абс. отм. 400—600 м), сильно расчлененный; подземные воды залегают на глубине от 5 до 44 м, выделяют временный водоносный горизонт (верховодка) и воды трещиноватой зоны юрско-меловых пород. Из фондовых материалов использованы данные по прочности (на одноосное сжатие — R_c , МПа) и показателям качества (RQD , %) скальных грунтов месторождения, выделены две группы: первая — $R_c 18—51$, $RQD < 25—50$ (качество массива очень плохое); вторая — $R_c 53—153$, $RQD > 50—75$ (качество массива среднее и хорошее). Кроме того, для метапесчаников и дацитов двух участков были обнаружены обобщенные значения прочности на одноосное сжатие (R_c , МПа) и растяжение (R_z , МПа), а также природной плотности (P_{np} , г/см³). На основе этих значений авторы статьи составили матрицу ($n = 6$, $m = 3$) и по программе кластерного анализа R -типа [2, 10] построили график-дендрограмму: горизонтальная ось — коэффициенты корреляции, вертикальная — признаки (рис. 1). При коэффициенте $> 0,7$ связи между признаками и их группами считаются существенными, $< 0,4$ — слабыми; значения коэффициента в пределах 0,4—0,7 свидетельствуют о средней степени связей (их можно назвать «заметными»).

Установлено, что природная плотность скальных грунтов (метапесчаников и дацитов) не влияет существенно на их прочность, поскольку коэффициент корреляции менее 0,40 (0,27). Аналогичная «аномалия» была выявлена ранее при изучении протерозойских песчаников Удокана, для которых ведущими факторами оказались особенности их микроструктуры и микротекстуры и различные признаки метаморфизма, установленные при изучении петрографических шлифов [13].

Кластер R

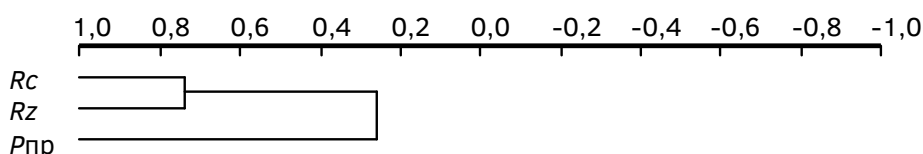


Рис. 1. Взаимосвязи прочности (R_c , R_z) и природной плотности (P_{np}) скальных грунтов

Fig. 1. Relationships between the strength (R_c , R_z) and the natural density (P_{np}) of the rocky soils

Объекты исследований

Скальные грунты. Коллекция включает образцы, отобранные в бортах карьера на горизонтах с абс. отметкой 330—340 м: № 1 — дацит (эффузив кислого состава), образец неправильной формы, светло-серого (почти белого) цвета, длина по плоской грани 6 см; в образце № 2 — «зона контакта» темно-серого метапесчаника (метаморфизованного песчаника) и светло-серого дацита, образец неправильной формы, длина по плоской грани 7 см; № 3 — метапесчаник темно-серого (почти черного) цвета, образец имеет неправильную форму и небольшие размеры (длина по плоской грани 4 см); № 4 — контакт темно-серого (почти черного) метапесчаника с дацитом светло-серого цвета, образец прямоугольной формы небольшого размера (длина 4 см); № 5 — метапесчаник черного цвета; образец неправильной формы и значительных размеров (длина по плоской грани 12 см), видны раковистые углубления, заметна слоистость; № 6 — метапесчаник темно-серого (почти черного) цвета; образец прямоугольной формы (длина 9 см, ширина 5 см), на верхней плоскости видна тонкая слоистость; № 7 — метапесчаник серого цвета; образец прямоугольной формы (длина 10 см, ширина 5 см), на боковых гранях имеются раковистые углубления, видна «веерообразная» слоистость в виде белесых пунктирных линий; № 8 — дацит светло-серого цвета; образец неправильной формы и значительных размеров (длина до 12 см), по боковой грани видны раковистые углубления, белые жилки и вкрапленники.

Дисперсные грунты. Коллекция представлена двумя образцами: № 1-а — черная глина (так называемая «глинка трения»); № 2-а — дресва и щебень светло-серых аргиллитов. Эти образования являются продуктами разломных зон, зафиксированных в бортах карьера.

Методические схемы лабораторного изучения скальных и дисперсных грунтов

Скальные грунты. Методическая схема лабораторного изучения образцов коллекции включала три «кластера» результатов: 1) измерение скорости распространения продольных сейсмических волн в образце — V_p , м/с, в сокращенном варианте — «сейсмическая скорость»; 2) определение показателей физических свойств — природной плотности ($P_{пр}$, г/см³), пористости (n , %), степени водопоглощения ($W_{вп}$, %), плотности минеральной части (P_s , г/см³); 3) изготовление и описание петрографических шлифов с указанием названия

породы, типов микроструктуры и микротекстуры, минералогического состава и признаков метаморфических воздействий. Прочность дацитов и метапесчаников на одноосное сжатие и растяжение не определялась по причине отсутствия образцов правильной геометрической формы, поэтому косвенная оценка уровня прочностных свойств проводилась через величину «сейсмической скорости». Согласно стандартному правилу повышенной прочности скальных грунтов соответствует высокая скорость распространения продольных сейсмических волн. Тем не менее часто в проявление этой закономерности вмешиваются «петрографические признаки».

Измерение «сейсмической скорости» выполнено для образцов коллекции в лабораторных условиях на приборе «Пульсар-2.2: измерение времени и скорости распространения ультразвука». Использовались два способа — поверхностное и сквозное прозвучивание образца, при этом определялись время прохождения ультразвука в микросекундах (T) и база (L) — расстояние между датчиками в миллиметрах. Затем проводился расчет скорости распространения продольных сейсмических волн:

$$V_p \text{ (м/с)} = L / T.$$

В крупных образцах скорость измерялась дважды — при поверхностном и сквозном прозвучивании с целью уточнения результата, в небольших кусочках — только методом сквозного прозвучивания.

Показатели природной плотности, водопоглощения и плотности минеральной части грунтов определялись в лаборатории по стандартным методикам, значения пористости получены расчетным путем [7]. Для оценки взаимосвязи «сейсмической скорости» скальных грунтов с их физическими параметрами применялась программа кластерного анализа R-типа [2, 10].

Каждый образец коллекции сопровождался «петрографической информацией» — приводилось уточненное название породы, типы ее микроструктуры и микротекстуры, минеральный состав (содержание главных, второстепенных, акцессорных минералов и вторичных образований), наличие метagenетических изменений в виде серицитизации, кальцитизации, катагенеза (процессы катаклаза) и бластогенеза (перекристаллизация в твердом состоянии).

Дисперсные грунты (продукты разломных зон). Наибольший интерес представляет черная глина — глина трения (образец № 1-а).

Методическая схема лабораторного изучения этого образца включает определение микроструктурных параметров (метод «Микроструктура»); изучение фазового минерального состава и оценку глинистых минералов; определение микроэлементного состава. Кроме того, установлены некоторые физико-химические показатели: плотность минеральной части глины, предел текучести, число пластичности, степень водоустойчивости [7], а также емкость катионного обмена, которая определялась по методу Л.И. Кульчицкого, опубликованному в качестве методических рекомендаций еще в 1977 г., но только в 2017 г. этот метод получил собственное название по фамилии автора [5].

Метод «Микроструктура» [6, 10] предполагает выполнение гранулометрического анализа (метод пипетки) с тремя способами подготовки образца и последующим расчетом общего содержания агрегатов и их разновидностей, содержания в агрегатах частиц различных размеров; далее устанавливаются реальная глинистость и тип микроструктуры.

При изучении минерального состава глины применяется метод порошковой дифракции, объединяющий качественный (фазовый) и полуколичественный анализы. Съемка проводится на дифрактометре D8 Advance (Bruker AXS, Германия). Фазовый состав проб расшифровывается с помощью программы EVA (Diffraction PDF-2, 2007), а также Американской картотеки ASTM PDF, полуколичественное соотношение компонентов рассчитывается по корундовым числам методом RIR [15]. Для идентификации глинистых минералов выполняется съемка ориентированного образца на дифрактометре «Дрон-3,0»; рентгенограммы идентифицируются с помощью программы поиска фаз.

Микроэлементный состав определяется рентгенофлуоресцентным методом с применением спектрометра S8 TIGER [9]. Для группы токсичных элементов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As, F) рассчитывается специальный показатель (Z_c), который характеризует степень загрязнения отложений: $Z_c = \sum [Kd - (n - 1)]$, где Kd — коэффициент концентрации i -го элемента в образце, равный для Co, Ni, Cu, Zn отношению концентрации токсичного элемента к фоновому содержанию, для Pb, As — отношению их содержаний к предельно допустимым концентрациям (ПДК); n — число учитываемых элементов ($n = 6$) [8].

Этот показатель характеризует удовлетворительную (<16), критическую (16—32), чрезвычайную (32—128) или катастрофическую (>128)

ситуацию по степени загрязнения отложений [4]. Кроме того, определяется коэффициент концентрации K_c , который показывает отношение конкретного содержания компонента (среднего или максимального) к величине кларка по А.П. Виноградову.

Для аргиллитов (обр. № 2-а — дресва и щебень из зоны дробления) методическая схема включала только выполнение гранулометрического анализа ситовым методом, определение микроэлементного состава и оценку водоустойчивости дресвы аргиллитов.

Результаты исследований и их обсуждение

Скальные грунты. Рассматриваются результаты определения скорости распространения продольных сейсмических волн (V_p , м/с) в каждом образце коллекции за исключением одного (№ 4), слишком небольшого размера (прибор в этом случае не работает). Одновременно получено описание петрографических шлифов.

Для образца № 1 (дацит) проведено сквозное прозвучивание в двух вариантах: а) $T = 13,8$; $L = 52$ мм; $V_p = 3768$ м/с; б) $T = 10,8$; $L = 45$ мм; $V_p = 4166$ м/с. При уменьшении базы L снижается время T , поэтому незначительно увеличивается «сейсмическая скорость». Далее получаем среднее значение показателя: $V_p = 4070$ м/с.

В шлифе порода определена как дацитовый порфир; структура порфиоровая; текстура пятнистая; размеры зерен 0,10—0,25 мм, порфиры достигают 0,60—4,00 мм; главные минералы: плагиоклаз (39%), калишпаты (19%), кварц (18%); второстепенные: кальцит (11%), серицит (10%), рудные (3%); акцессорные (единичные зерна): апатит, сфен, лейкоксен; вторичные образования: кальцит, серицит, гидроокислы железа. Основная масса породы скрытокристаллической фельзитовидной структуры, порфиоровые включения представлены полевыми шпатами и кварцем, отмечаются участки аллотриоморфной структуры (минералы не имеют четких кристаллических очертаний); полевые шпаты интенсивно кальцитизированы и серицитизированы; неравномерно распределены кварц-полевошпатовые фельзитовые агрегаты, в пределах которых отмечаются мелкие зерна реликтового рудного минерала, замещенного лейкоксом. Влияние дислокационного метаморфизма проявлено в виде катаклаза (микротрещиноватость).

Для образца № 5 (метапесчаник) в трех вариантах проведено поверхностное прозвучивание: а) $T = 19,6$; $L = 120$ мм; $V_p = 6122$ м/с; б) $T = 21,1$;

$L = 120$ мм; $V_p = 5970$ м/с; в) $T = 19,7$; $L = 120$ мм; $V_p = 6091$ м/с; среднее значение: $V_p = 6061$ м/сек. При сквозном прозвучивании «сейсмическая скорость» оказалась меньше (в среднем 4900 м/с), возможно, по причине визуально замеченной трещинки.

В шлифе порода определена как метапесчаник; микроструктура псаммитовая, размер зерен 0,1—0,3—0,7 мм, редко 1,2 мм, текстура не ясно ориентированная; главные минералы: полевые шпаты (38%), кварц (18%), кроме того, много обломков пород (29%); второстепенные (2—5%): кальцит, биотит, рудные, серицит; акцессорные (единичные зерна): циркон, лейкоксен; вторичные минералы: кварц, кальцит. Зерна в песчанике угловатые, цемент — базально-поровый и поровый (до 16%), глинистый. Зерна полевых шпатов (плагиоклазы серицитизированы, калишпаты пелитизированы) и кварца имеют корродированные контуры, края разъедены глинистым цементом. Кроме того, для кварца отмечено волнистое погасание. Обломки пород представлены алевролитами, аргиллитами, эффузивами среднего состава, редко встречаются кремни и гранитоиды. Между полевыми шпатами и кварцем отмечаются деформированные (изогнутые) зерна биотита, частично хлоритизированные и гидратированные. Ксеноморфные (не имеют кристаллографических очертаний) зерна рудного минерала заполняют межзерновые пространства. По микротрещинам наблюдаются ксеноморфные зерна кальцита. Метагенетические изменения в песчанике проявлены в виде окварцевания и кальцитизации; влияние высокого давления подтверждается присутствием сдавленных зерен кварца с волнистым погасанием.

Таким образом, скорость распространения продольных сейсмических волн («сейсмическая скорость») в метапесчанике (обр. № 5) оказалась выше (6061 м/с) по сравнению с дацитом (4070 м/с — обр. № 1). Причина этих различий, вероятнее всего, заключается в особенностях микроструктуры и микротекстуры, составе главных минералов и признаках изменений, связанных с метаморфизмом.

Дациит имеет порфировую (разнородную) микроструктуру и пятнистую микротекстуру, среди главных минералов преобладают плагиоклазы и калишпаты (в сумме 58%), присутствуют неравномерно распределенные кварц-полевошпатовые фельзитовые агрегаты; признаки метаморфизма — катаклаз, серицитизация и кальцитизация.

Метапесчаник имеет псаммитовую (однородную) микроструктуру, среди главных минералов — серицитизированные плагиоклазы и пелитизированные калишпаты (38%), кварц (18%), отмечено много обломков пород (29%) — алевролитов, аргиллитов, эффузивов; имеются сдавленные зерна кварца (волнистое погасание), деформированные зерна биотита, что связано с влиянием высокого давления при метаморфизме; проявлено окварцевание и кальцитизация.

В других образцах метапесчаника (№ 3, 6) отмечена пониженная «сейсмическая скорость» (4159—4133 м/сек). Почему? В шлифе видно, что они интенсивно катаклазированы, при этом в зоне катаклаза наблюдается перекристаллизация обломочного кварца в гранобластовый агрегат и его обособление в отдельные линзы и гнезда. Для образца № 7 «сейсмическая скорость» повышается до 5074 м/сек; калишпаты пелитизированы каолинитом, плагиоклазы — серицитизированы; кварц — трещиноватый, имеет волнистое погасание (признак катаклаза). Для метапесчаников характерно высокое содержание обломков пород.

В «комбинированном» образце № 2, где наблюдается контакт светлого дацита и темно-серого метапесчаника, проведено сквозное прозвучивание в трех вариантах: а) $T = 12,3$; $L = 58$ мм; $V_p = 3700$ м/сек; б) $T = 16,0$; $L = 74$ мм; $V_p = 4600$ м/сек; в) $T = 15,0$; $L = 66$ мм; $V_p = 4400$ м/сек; среднее значение: $V_p = 4233$ м/сек. «Сейсмическая скорость» оказалась в пределах 3700—4600 м/сек.

Для образца № 2 отдельно были изготовлены шлифы для дацита и метапесчаника. В даците определена фельзитовая микроструктура, кроме того, установлено, что кристаллы плагиоклаза подвержены интенсивному бластогенезу — они перекристаллизованы в субгранобластовую массу с сохранением реликтовой формы отдельных кристаллов; на контакте с метапесчаником видны скопления перекристаллизованного гранобластового кварца. Кроме того, метапесчаник и дацитовый порфир катаклазированы (микротрещины) и интенсивно кальцитизированы. В песчанике окварцевание обломочного материала (плагиоклазов) развито в меньшей степени по сравнению с серицитизацией.

Таким образом, признаки катаклаза (кластогенеза) и бластогенеза наблюдаются как в даците, так и метапесчанике, поэтому для «комбинированного» образца № 2 происходит снижение «сейсмической скорости» до 3700 м/сек.

О взаимосвязи скорости распространения продольных сейсмических волн в образцах скальных грунтов с показателями их физических свойств

Для образцов коллекции скальных грунтов составлена матрица, которая включает значения «сейсмической скорости» (V_p) для дацита и песчаника и показатели их физических свойств (табл. 1).

На основе этих данных в Excel по программе кластерного анализа R -типа выполнялась количественная оценка взаимосвязей между wybranymi параметрами — признаками. Для этой цели получены две дендрограммы.

Первый график-дендрограмма построен при участии всех признаков для семи образцов (исключен № 4, для которого измерения скорости не проводились) (рис. 2). По горизонтальной оси указан коэффициент корреляции (от 0 до ± 1), по вертикальной расположены признаки.

Водопоглощение связано с пористостью на максимальном уровне — коэффициент корреляции равен единице (это первая группа признаков), также значительны взаимосвязи между двумя видами плотности — коэффициент корреляции 0,85 (вторая группа), при этом связь между указанными группами отсутствует (коэффициент корреляции равен нулю); «сейсмическая скорость» (V_p) обнаруживает обратную зависимость от показателей первой группы — пористости и водопоглощения (коэффициент

корреляции $-0,45$). Значит, чем выше эти показатели, тем ниже скорость распространения в скальном грунте продольных сейсмических волн. Плотности (природная и минеральной части), которые не связаны с пористостью и водопоглощением, также не попадают в сферу влияния «сейсмической скорости» (V_p). Почему? Видимо, пористость, а значит, и водопоглощение определяются особенностями микроструктуры — микротекстуры и признаками метаморфизма, которые можно зафиксировать только на микроуровне (в шлифе).

Максимальная скорость распространения продольных сейсмических волн в образце № 5 (6061 м/сек) определяется минимальными значениями пористости (0,20%) и водопоглощения (0,08%) (табл. 1). Природная плотность дацита и метапесчаника находится в пределах 2,65—2,72 г/см³ (среднее значение 2,69). Для сравнения можно привести данные по гранитам, габбро, пироксенитам, кварцитам, сланцам и гнейсам: для гранита среднее значение плотности (11 217 образцов) 2,57 г/см³, диорита — 2,81 (3683 образца), габбро — 2,95 (1990 образцов), пироксенита — 3,20 (2895 образцов), кварцита — 2,61, сланцев — 2,72, гнейса — 2,70—3,10 [3, с. 51—59]. Метапесчаники и дациты коллекции по природной плотности близки к сланцам и кварцитам.

Второй график построен для семи образцов коллекции с тремя признаками (P_{np} , n , V_p) (рис. 3).

Таблица 1. Матрица данных для построения графика-дендрограммы (программа кластерного анализа R -типа)
Table 1. Data matrix for plotting the dendrogramme (R -type cluster analysis software)

Номер образца коллекции / Sample number of the collection	Петрографический тип / Petrographic type	V_p , м/с V_p , m/s	P_{np} , г/см ³ P_{np} , g/cm ³	P_s г/см ³ P_s , g/cm ³	n , %	$W_{вп}$, %
1	Даци́т / Dacite	4070	2,65	2,69	1,4	0,53
2	«Комбинированный» образец (дацит-метапесчаник) / “Combination” sample (dacite-metasandstone)	4233	2,68	2,71	1,0	0,37
3	Метапесчаник / Metasandstone	4159	2,65	2,71	2,2	0,82
5	Метапесчаник / Metasandstone	6061	2,67	2,68	0,2	0,08
6	Метапесчаник / Metasandstone	4133	2,72	2,75	1,2	0,43
7	Метапесчаник / Metasandstone	5074	2,69	2,73	1,3	0,50
8	Даци́т / Dacite	5105	2,65	2,69	1,4	0,54

Примечание: Показатели свойств: V_p — скорость распространения продольной сейсмической волны в образце («сейсмическая скорость»), P_{np} — природная плотность, P_s — плотность минеральной части грунта, n — пористость, $W_{вп}$ — водопоглощение.

Note: Properties metrics: V_p is the velocity of propagation of dilatational seismic wave in the sample (“seismic speed”), P_{np} is the natural density, P_s is the soil mineral part density, n is the porosity, $W_{вп}$ is the water adsorption.

Кластер R



Рис. 2. Взаимосвязи «сейсмической скорости», плотности (природной и минеральной части), пористости и водопоглощения скальных грунтов ($n = 7$, $m = 5$); горизонтальная ось — коэффициент корреляции между признаками (от 0 до +1,0; от 0 до -1,0)

Fig. 2. Relationships between the «seismic speed», the natural density and the density of mineral part, the porosity and the water adsorption of the rocky soils ($n = 7$, $m = 5$); horizontal axis is the correlation coefficient between the attributes (from 0 to +1.0; from 0 to -1.0)

Кластер R

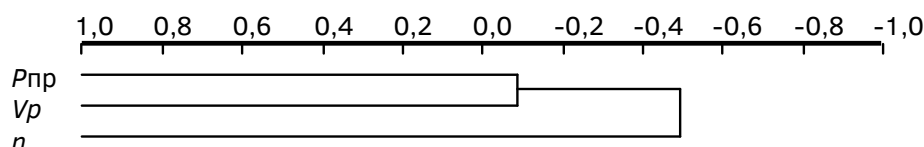


Рис. 3. Взаимосвязи «сейсмической скорости» (V_p), пористости (n), природной плотности ($P_{пр}$) в скальных грунтах ($n = 7$, $m = 3$); горизонтальная ось — коэффициент корреляции между признаками (от 0 до +1,0; от 0 до -1,0)

Fig. 3. Relationships between the «seismic speed» (V_p), the porosity (n), the natural density ($P_{пр}$) in the rocky soils ($n = 7$, $m = 3$); horizontal axis is the correlation coefficient between the attributes (from 0 to +1.0; from 0 to -1.0)

Установлено, что «сейсмическая скорость» (V_p) также имеет заметную, но обратную взаимосвязь с пористостью (коэффициент корреляции составляет -0,45); природная плотность почти не влияет на этот показатель (коэффициент корреляции близок к нулю).

Следовательно, в метапесчанике (обр. № 5) меньше пористость, выше скорость распространения продольных сейсмических волн и больше прочность, в дацитах — выше пористость, ниже скорость продольных сейсмических волн и меньше прочность.

О факте отсутствия влияния плотности на скорость распространения продольных сейсмических волн в скальных грунтах (а значит, и на прочность) приведены данные в начале статьи [13]. Представленные зависимости подтверждают роль петрографической информации для оценки сейсмических и прочностных свойств скальных грунтов.

Дисперсные грунты (продукты разломных зон)

Черная глина — обр. № 1-а. Микроструктура. Используется специальный метод «Микроструктура», разработанный в лаборатории инженерной геологии и геоэкологии ИЗК СО РАН [6, 10].

Выполняется гранулометрический анализ образца методом пипетки с различными способами подготовки и рассчитываются коэффициенты микроагрегатности для каждой фракции ($K_{ма}^*$) (табл. 2).

С помощью специальных расчетов определяется общее содержание агрегатов (34,1% — сумма коэффициентов микроагрегатности с отрицательным знаком), что согласно разработанной классификации соответствует скелетно-агрегированному типу структуры глины; среди первичных (свободных) частиц выявлено преобладание песчаных (1,00—0,05 мм — 38,6%), крупнопылеватых (0,05—0,01 мм — 19,9%) и отсутствие глинистых (<0,002 мм); реальная глинистость (общее содержание фракции <0,002 мм в агрегатах и свободном состоянии) составляет 19,4% (определяется при дисперсном способе подготовки образца к гранулометрическому анализу) (табл. 2). При стандартной подготовке образца содержание фракции <0,002 мм составляет всего 0,5% (см. табл. 2), поэтому этот образец следует относить к песку, что не соответствует действительности. На самом деле — это пылевато-песчаная глина со скелетно-агрегированной микроструктурой, в которой первичных песчаных частиц 38,6%, пылеватых 27,2%, агрегатов

Таблица 2. Гранулометрический анализ глины с различными способами подготовки образца
Table 2. Granulometric analysis of clay with different sample preparation procedures

Способ подготовки образца / Preparation procedure of the sample	Содержание фракций, % / Fractions content (%)					
	1,00—0,25 мм / 1.00—0.25 mm	0,25—0,05	0,05—0,01	0,01—0,002	0,002—0,001	<0,001
	Мпс1 / Mps1	Мпс2 / Mps2	Мп1 / Mp1	Мп2 / Mp2	Мгл1 / Mgl1	Мгл2 / Mgl2
I	35,7	37,0	19,9	7,3	0,1	0,0
II	29,5	33,7	30,4	3,2	0,3	0,2
III	18,6	20,0	22,9	19,9	3,8	15,6
Кма* / Kma*	-17,1	-17,0	+ 3,0	+12,6	+ 3,7	+15,6

Примечание: I, II, III — агрегатный, полудисперсный-стандартный, дисперсный способы подготовки; Мпс1 — средне-крупно-песчаная фракция, мм, Мпс2 — тонко-мелкопесчаная, Мп1 — крупнопылеватая, Мп2 — мелкопылеватая, Мгл1 — грубоглинистая, Мгл2 — тонкоглинистая; Кма* — коэффициент микроагрегатности для каждой фракции с положительным или отрицательным знаком.

Note: I, II, III are aggregate, semi-dispersed-standard, dispersed preparation procedures; Mps1 is medium-gritty fraction, mm, Mps2 is fine sandy fraction, Mp1 is coarse pulverescent fraction, Mp2 is fine pulverescent fraction, Mgl1 is coarse clay fraction, Mgl2 is fine clay fraction; Kma* is microaggregation factor for each fraction with positive or negative sign.

Таблица 3. Гранулометрический состав крупнообломочного грунта разломной зоны
Table 3. Granulometric composition of the coarse clastic soil of the fault zone

Номер образца / Sample number	Размеры (мм) и содержание фракций, % / Sizes (mm) and fractions content (%)									
	>10	10—7	7—5	5—3	3—2	2—1	1—0,5	0,5—0,25	0,25—0,10	<0,10
2-а	28,7	15,5	11,9	14,6	8,7	8,3	3,3	4,0	2,8	2,2

34,1%; глинистые фракции полностью мобилизованы в агрегаты (в свободном состоянии их нет).

Минеральный состав. В исследованном образце установлен следующий фазовый состав: кварц составляет $65 \pm 5\%$, доломит $10 \pm 5\%$. Глинистые минералы представлены смектитом ($10 \pm 5\%$) и гидрослюдой ($10 \pm 5\%$), возможны смешаннослойные минералы типа гидрослюда-смектит, отмечены следы хлорита и каолинита.

Физико-химические свойства. Определены следующие показатели: плотность минеральной части $2,69 \text{ г/см}^3$, предел текучести $24,4\%$, время размокания воздушно-сухого образца ненарушенной структуры — 10 минут 38 секунд. Число пластичности рассчитано по прогнозным формулам с применением предела текучести: $Ip1 = 7,3$; $Ip2 = 5,5$; $Ip = 6,7\%$ [12]. На основании представленных данных можно заключить, что пылеватая (27,2%) — песчаная (38,6%) глина, имеющая скелетно-агрегированную микроструктуру (А34,1%) и реальную глинистость 19,4%, является слабо пластичной (5,5—6,7%) и водонеустойчивой (очень быстро размокает — менее 30 минут).

Смектит, гидрослюда и смешаннослойные минералы в глинистой фракции определили проявление физико-химической активности

образца — емкость катионного обмена составляет 21 мг-экв на 100 г вещества.

Щебенисто-дресвяный грунт — обр. № 2-а.

Ситовым методом получены результаты гранулометрического состава образца (табл. 3). Преобладают крупные щебенистые обломки размером более 10 мм (28,7%); дресва (размер 10—2 мм) составляет 50,7%; песчаные фракции (2,0—0,1 мм) — 18,4%, тонкие песчаные частицы (<0,10 мм) только 2,2%. Таким образом, исследованный продукт разломной зоны в скальных породах месторождения (образец отобран в карьере при полевом обследовании его стенок) представлен щебенисто-дресвяным материалом (это светло-серый аргиллит) с небольшой примесью песчаных фракций.

Для обломков воздушно-сухого аргиллита ненарушенной структуры на специальном приборе ПРГ-1 определялось время размокания для оценки их водостойчивости. Установлено, что обломки являются водостойчивыми — они не разрушались в течение суток и более.

Микроэлементный состав (образцы № 1-а, № 2-а). Определялось содержание 25 элементов (ppm = 0,0001%): V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As, Sn, Ba, Sr, Zr, Ce, Rb, S, F, La, Nd, Y, Nb, Ga, W, Mo, U, Th. Для токсичных компонентов черной глины (№ 1-а) и дресвы аргиллита (№ 2-а) рассчитаны

Таблица 4. Содержание токсичных микроэлементов (ppm), коэффициенты загрязнения и концентрации
Table 4. Toxic microelements content (ppm), pollution factors and concentration coefficients

Образцы / Samples	Микроэлементы / Microelements									Zc
	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	As	F	
C-1-a	104	48	11	16	26	75	17	11	274	14
Ckl	90	83	18	58	47	83	16	1,7	660	
Kc	1,16	0,58	0,61	0,28	0,55	0,90	1,10	6,47	0,42	
C-2-a	72	39	10	16	18	47	15	8	324	11
Ckl	90	83	18	58	47	83	16	1,7	660	
Kc	0,80	0,47	0,56	0,28	0,38	0,57	0,94	4,71	0,49	

Примечание: C — содержание микроэлемента в образце; Ckl — кларк по А.П. Виноградову (ppm); Kc — коэффициент концентрации (C/Ckl); Zc — коэффициент загрязнения.

Note: C is the microelement content in the sample; Ckl is the clark according to A.P. Vinogradov (ppm); Kc is the concentration coefficient (C/Ckl); Zc is the pollution factor.

коэффициенты загрязнения (Zc) и концентрации (Kc) (табл. 4).

Установлено, что исследованные продукты имеют удовлетворительный уровень по степени загрязнения ($Zc < 16$); коэффициенты концентрации $< 1,0$, исключением является мышьяк ($Kc = 4,71—6,47$); радиоактивный торий присутствует в количестве 9—11 ppm. Из числа других элементов первое место занимает барий (496—549 ppm), второе — стронций (238—253), далее — цирконий (160—169). Кроме того, образцы обогащены серой, особенно черная глина — 3214 ppm (в аргиллитах 696).

Выводы

Представлены и реализованы методические схемы лабораторного изучения скальных грунтов и продуктов их разломных зон по образцам коллекции, образцы которой были отобраны при полевом обследовании карьера Албазинского золоторудного месторождения на севере Хабаровского края; использованы: фондовые материалы инженерно-геологического характера по району месторождения. Предметом изучения является коллекция образцов, которая не претендует на значительное количество объектов, необходимых для представительных обобщений, тем не менее предложенные методические схемы можно рекомендовать для дальнейших исследований.

Для скальных грунтов коллекции, представленных темно-серыми (почти черными) метапесчаниками и светло-серыми дацитами, выполнены комплексные исследования, которые включали измерения в образце скорости распространения продольных сейсмических волн с помощью спе-

циального прибора «Пульсар-2.2: измерение времени и скорости распространения ультразвука» (сквозное и поверхностное прозвучивание), определение основных показателей физических свойств и петрографическую информацию.

При использовании программы кластерного анализа R-типа получен «аномальный» вывод об отсутствии влияния плотности грунта на сейсмические свойства. Установленная обратная зависимость «сейсмической скорости» от показателей физических свойств метапесчаника и дацита (коэффициент корреляции $-0,45$) можно объяснить, вероятнее всего, текстурно-структурными признаками, минеральным составом пород и последствиями метаморфизма — признаками катаклаза и бластогенеза.

Продукты разломных зон в скальных грунтах месторождения представлены, с одной стороны, пластичными черными глинами, которые размокают за 10 минут, с другой — дресвой и щебнем водоустойчивых аргиллитов; по содержанию токсичных микроэлементов они имеют удовлетворительный уровень загрязнения ($Zc < 16$). В то же время наибольшую опасность представляет черная пластичная водонеустойчивая пылевато-песчаная глина со скелетно-агрегированной микроструктурой и реальной глинистостью 19,4%, которая при водонасыщении может создавать опасные зоны для нарушения устойчивости бортов карьера (играет роль плоскостей скольжения).

В работе задействовалось оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абатурова И.В.* Оценка и прогноз инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых горно-складчатых областей. Екатеринбург: ФГБОУ «Уральский государственный горный университет», 2011. 226 с.
2. *Данилов Б.С.* Кластерный анализ в EXCEL // Структура литосферы и геодинамика. Иркутск, Институт земной коры СО РАН. 2001. С. 18—19.
3. Инженерная геология России. Грунты России / Под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королева. — М.: КДУ, 2011. Т. 1. 672 с.
4. Критерии оценки экологической обстановки территории для выявления зон экологической ситуации и зон экологического бедствия. М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации, 1992.
5. Лабораторные работы по грунтоведению: Учебное пособие / Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королева. 3-е изд. М.: КДУ, Университетская книга, 2017. 634 с.
6. Лессовые грунты Монголо-Сибирского региона. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2014. 241 с.
7. *Ломтадзе В.Д.* Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. Л.: Недра, 1990. 327 с.
8. *Порядин А.Ф., Хованский А.Д.* Оценка и регулирование качества окружающей природной среды. М.: Издательский дом «Прибой», 1996. 350 с.
9. *Ревенко А.Г.* Физические и химические методы исследования горных пород и минералов в Аналитическом центре ИЗК СО РАН // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5 (1). С. 101—114.
10. *Рященко Т.Г.* Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010. 287 с.
11. *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 Международной научной конференции. М.: МГУ, 2021. С. 268—272.
12. *Рященко Т.Г., Тирских С.А.* Определение пластичности глинистых и лессовых грунтов: оценка расчетного метода и рекомендации // Инженерные изыскания. 2016. № 8. С. 15—19.
13. *Рященко Т.Г., Тирских С.А., Корнилова Т.А., Брызжак Е.В.* Комплексная инженерно-геологическая оценка протерозойских песчаников (строительная площадка в районе Удокана) // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2015. № 3. С. 51—58.
14. *Фролова Ю.В.* Современные подходы к изучению скальных грунтов и их массивов (Обзор по материалам XII Конгресса МАИГ — 2014) // Геоэкология. 2015. № 6. С. 553—560.
15. *Hubbard C.R., Snuder R.I.* RIR. Measurement and Use in Quantitative XRD // Powder Diffraction. 1988. V. 3. P. 74—77.

REFERENCES

1. Abaturova I.V. Evaluation and forecast of engineering-geological conditions of solid minerals deposits in mountain-folded areas. Ekaterinburg: Ural State Mining University, 2011. 226 p. (In Russian).
2. Danilov B.S. Cluster analysis in EXCEL // Structure of the lithosphere and geodynamics. Irkutsk, Institute of the Earth's Crust, SB RAS. 2001. P. 18—19 (In Russian).
3. Engineering Geology of Russia. Soils of Russia / Ed. Trofimov V.T., Voznesenskiy E.A., Korolev V.A. Moscow: UBH, 2011. V. 1. 672 p. (In Russian).
4. Criteria for assessing the ecological situation of the territory to identify zones of the ecological situation and zones of ecological disaster. Moscow: Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of the Russian Federation, 1992 (In Russian).
5. Laboratory work on soil science. Textbook / Ed. Trofimov V.T. and Korolev V.A. 3rd ed. Moscow: UBH, University book, 2017. 634 p. (In Russian).
6. Loess soils of the Mongolian-Siberian region. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, SB RAS, 2014. 241 p. (In Russian).
7. Lomtadze V.D. Physical and mechanical properties of rocks. Methods of laboratory research. Leningrad.: Nedra. 1990. 327 p. (In Russian).
8. Poryadin A.F., Khovanskiy A.D. Assessment and regulation of environmental quality. Moscow: Priboy, 1996. 350 p. (In Russian).
9. Revenko A.G. Physical and chemical methods for the study of rocks and minerals in the Analytical Center of the IEC, SB RAS. Geodynamics and Tectonophysics. 2014. T. 5 (1). P. 101—114 (In Russian).
10. Ryashchenko T.G. Regional soil science (Eastern Siberia). Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, SB RAS. 2010. 287 p. (In Russian).
11. Ryashchenko T.G., Maslov E.A. Experience of engineering-geological assessment of rocky soils (Albazinskoye field in the north of the Khabarovsk Territory). New ideas and theoretical aspects of engineering geology. Proceedings of the International Scientific Conference. Moscow: MGU, 2021. P. 268—272 (In Russian).
12. Ryashchenko T.G., Tirskikh S.A. Determination of the plasticity of clay and loess soils: assessment of the calculation method and recommendations // Engineering surveys. 2016. No. 8. P. 15—19 (In Russian).
13. Ryashchenko T.G., Tirskikh S.A., Kornilova T.A., Bryzhak E.V. Comprehensive engineering-geological assessment of Proterozoic sandstones (construction site in the Udokan area) // News of Higher Educational Institutions. Geology and exploration. 2015. No. 3. P. 51—58 (In Russian).
14. Frolova Yu.V. Modern approaches to the study of rocky soils and their massifs (Review based on the materials of the XII Congress of IAIG — 2014) // Geoecology. 2015. No. 6. P. 553—560 (In Russian).
15. Hubbard C.R., Snuder R.I. RIR. Measurement and Use in Quantitative XRD // Powder Diffraction. 1988. V. 3. P. 74—77.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Рященко Т.Г. — провела большую часть инженерно-геологических и минералогических исследований грунтов, разработала концепцию статьи, подготовила текст статьи и окончательно утвердила публикуемую версию статьи, вклад составляет 50%.

Маслов Е.А. — собрал для исследования образцы скальных грунтов в карьере, оказал помощь в подготовке текста статьи, вклад составляет 15%.

Брыжак Е.В. — выполнил измерение «сейсмической скорости» в образцах исследуемых грунтов, провел анализ полученных данных, вклад составляет 10%.

Штельмах С.И. — провела определение концентраций химических элементов в образцах исследуемых грунтов, рассчитала коэффициент загрязнения, выполнила перевод на английский язык, вклад составляет 25%.

Tamara G. Ryashchenko — carried out most of the engineering-geological studies and mineralogical research of the soils, developed the concept of the article, prepared the article text and finally approved the published version of the article, the contribution is 50%.

Egor A. Maslov — collected rock soils samples for research in quarry, assisted in the preparation of the article text, the contribution is 15%.

Evgeny V. Bryzhak — performed the measurement of “seismic speed” in the samples of the studied soils, analyzed the obtained data, the contribution is 10%.

Svetlana I. Shtel'makh — carried out the determination of the chemical elements concentrations in the samples of the studied soils, calculated the pollution factor, translated into English, the contribution is 25%.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Рященко Тамара Гурьевна* — доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории инженерной геологии и геоэкологии Института земной коры СО РАН.
128, ул. Лермонтова, г. Иркутск 664033, Россия
e-mail: ryashenk@crust.irk.ru
тел.: +7 (914) 885-43-75
SPIN-код: 8791-2620
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5839-3471>

Маслов Егор Александрович — аспирант Института земной коры СО РАН.
128, ул. Лермонтова, г. Иркутск 664033, Россия
e-mail: MaslovEA@polymetall.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1602-1557>

Брыжак Евгений Вадимович — кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией инженерной сейсмологии и сейсмогеологии Института земной коры СО РАН.
128, ул. Лермонтова, г. Иркутск 664033, Россия
e-mail: bryzhak@crust.irk.ru
тел.: +7 (902) 569-87-25
SPIN-код: 3053-8213
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7550-4447>

Штельмах Светлана Ивановна — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН.
128, ул. Лермонтова, г. Иркутск 664033, Россия
e-mail: fotina78@gmail.com
тел.: +7 (914) 890-88-30
SPIN-код: 3418-6738
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0138-841X>

Tamara G. Ryashchenko* — Dr. of Sci. (Geol.-Min.), Prof., Leading Researcher of the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology of the Institute of the Earth's Crust, SB RAS.
128, Lermontov str., Irkutsk 664033, Russia
e-mail: ryashenk@crust.irk.ru
tel.: +7 (914) 885-43-75
SPIN-code: 8791-2620
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5839-3471>

Egor A. Maslov — Post-graduate researcher of the Institute of the Earth's Crust, SB RAS.
128, Lermontov str., Irkutsk 664033, Russia
e-mail: MaslovEA@polymetall.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1602-1557>

Evgeny V. Bryzhak — Cand. of Sci. (Geol.-Min.), Head of the Laboratory of Engineering Seismology and Seismogeology of the Institute of the Earth's Crust, SB RAS.
128, Lermontov str., Irkutsk 664033, Russia
e-mail: bryzhak@crust.irk.ru
tel.: +7 (902) 569-87-25
SPIN-code: 3053-8213
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7550-4447>

Svetlana I. Shtel'makh — Cand. of Sci. (Geol.-Min.), Researcher of the Center for Collective Use “Geodynamics and geochronology” of the Institute of the Earth's Crust, SB RAS.
128, Lermontov str., Irkutsk 664033, Russia
e-mail: fotina78@gmail.com
tel.: +7 (914) 890-88-30
SPIN-code: 3418-6738
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0138-841X>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author