

УДК 550.83.04:550.812:553.078

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД МЕСТОРОЖДЕНИЯ АРГУНСКОЕ

© 2020 г. В.А. Минаев^{1,5}, С.А. Устинов^{1,2}, И.О. Нафигин¹, В.А. Петров^{1,3},
В.В. Полуэктов¹, И.В. Фокин⁴, Н.А. Егоров⁴

¹ *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
г. Москва, Россия*

² *Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе,
г. Москва, Россия*

³ *Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия*

⁴ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

⁵ *Институт проблем комплексного освоения недр РАН им. акад. Н.В. Мельникова,
г. Москва, Россия*

К 2023 г. планируется начало отработки месторождения Аргунское, заключающего в своих недрах до 35 % запасов урана Стрельцовского рудного поля в Восточном Забайкалье. Сложное геолого-структурное строение месторождения Аргунское и исключительная гетерогенность толщи вмещающих пород, представленных гранитоидами, гнейсами, кристаллическими сланцами, сиенит-порфирами, мраморизованными известняками, базальтами и др., обуславливает необходимость выявления физико-механических свойств вмещающих пород. Это необходимо, в первую очередь, для обеспечения безопасности и оптимизации горнопроходческих работ, а также выявления закономерностей локализации рудных тел. Значительно осложняет ситуацию широкий спектр постмагматических, гидротермально-метасоматических и деформационных преобразований пород различного генезиса. Были отобраны образцы вмещающих пород массива месторождения Аргунское, локализованные вблизи рудных тел. Определены их пористостно-плотностные свойства, характер и интенсивность минеральных и деформационных (структурно-петрологических) преобразований; изучены упругие параметры и проведены геомеханические испытания в комплексе с минералого-петрографическим изучением пород. Выявлены различия в составе и свойствах вмещающих пород, зафиксированы их петрофизические характеристики, которые могут иметь значение для дальнейшей эксплуатации месторождения. Результаты исследований позволили предположить, что доломитизированные известняки, максимально контрастные с гранитами и гнейсами, могут выступать в роли геохимического барьера на пути фильтрации рудоносных растворов, способствуя осаждению рудных компонентов. Показано влияние характера и интенсивности минеральных и деформационных (структурно-петрологических) преобразований пород на их физические свойства.

Ключевые слова: геомеханика, петрофизика, месторождение урана, ультразвук.

Введение

Созданное в 1968 г. Приаргунское производственное горно-химическое объединение (далее – ПАО “ППГХО”) на данный момент является крупнейшим уранодобывающим предприятием России. Добыча урана ведется подземным способом на базе двух действующих рудников – № 1 (месторождение Антей) и № 8 (месторождение Мало-Тулукуевское). Месторождение Антей, локализованное на глубинах 550–870 м в относительно однородных гранитоидах фундамента Стрельцовской кальдеры, в настоящее время представляет собой основной источник урана на Стрельцовском рудном поле, находящемся в Восточном Забайкалье в 460 км к юго-востоку от г. Чита. Однако

в связи с прогнозируемой к 2023 г. отработкой его запасов ПАО “ППГХО” приняло решение о временной консервации этого рудника. В ближайшем будущем планируется ввести в эксплуатацию рудник № 6, на базе которого начнётся отработка месторождения Аргунское, заключающего в своих недрах до 35 % запасов урана Стрельцовского рудного поля. На данный момент проводятся работы по созданию необходимой инфраструктуры, подготовка к проходке горных выработок, ведётся бурение разведочных и гидрогеологических скважин.

Месторождение Аргунское расположено в фундаменте Западного литолого-структурного блока Стрельцовской кальдеры в осевой части восток–северо-восточной Аргунской зоны глубинных разломов, в узле пересечения которой с меридиональным разломом сформирован основной магмо- и рудоподводящий канал. В этой части кальдеры находятся Краснокаменский и Юго-Западный вулканические аппараты, вследствие чего в геологическом разрезе преобладают кислые эффузивы жерловых фаций. Особенностью Западного блока является гетерогенный состав фундамента, в котором интенсивно проявлены неоднократные процессы кремнещелочного метасоматоза, кислотного выщелачивания и гидротермальных преобразований.

В отличие от других месторождений Стрельцовского рудного поля, на месторождении Аргунское, наряду со структурными факторами, особое значение в процессах рудообразования имели литологический контроль и химический состав пород. Доломитизированные известняки, химически контрастные с гранитами, играли роль геохимического барьера на пути фильтрации рудоносных растворов, способствовавшего осаждению рудных компонентов (рис. 1). В результате сочетания благоприятных гидродинамических и геохимических факторов сформировались богатые урановорудные и молибденовые залежи, локализованные в пределах трех обособленных в пространстве рудоносных трещинных зон. Все многообразие рудных тел, сформировавшихся в рудоносных зонах, подразделяется на два пространственно взаимосвязанных морфологических типа – жилообразные и штокверкоподобные [Ищукова, 2007].

Необходимость изучения физико-механических свойств вмещающих пород месторождения определяется рядом факторов, среди которых нормативные требования к проектированию и разработке месторождений [Правила ..., 2018]; сложное комплексное строение месторождения Аргунское; выявление невоскрисанных “слепых” рудных тел при геомеханических исследованиях, моделировании напряженно-деформированного состояния массива и решении других научно-практических задач. Результаты изысканий заложат основу актуальной базы данных характеристик месторождения Аргунское.

На сегодняшний день методы структурно-петрофизического анализа горных пород применяются в первую очередь при изучении свойств коллекторов углеводородов (см., например, [Paul, Okwueze, Udo, 2018; Rashid, Hussein, Zangana, 2020] и др.). Однако совершенствуются и приобретают всё большую актуальность методы структурно-петрофизического анализа рудных месторождений и массивов кристаллических горных пород. Эти методы используются при изучении природы образования грейзенов на олово-вольфрамовых месторождениях [Launay et al., 2019], при исследовании проблем корреляции и интерпретации петрофизических данных на золоторудных месторождениях [Bourne, Dentith, Jumeau, 2018], при рассмотрении вопросов автоматизации интерпретации петрофизических данных пород железорудных месторождений [Kitzig, Kopic, 2016]. Для изучения кристаллических массивов реализуется комплексный подход, включающий и геомеханические испытания исследуемых образцов [Gupta, Sharma, 2012; Kibikas, Carpenter, Ghassemi, 2019]. Результаты использования такого подхода можно проследить и в данной статье.

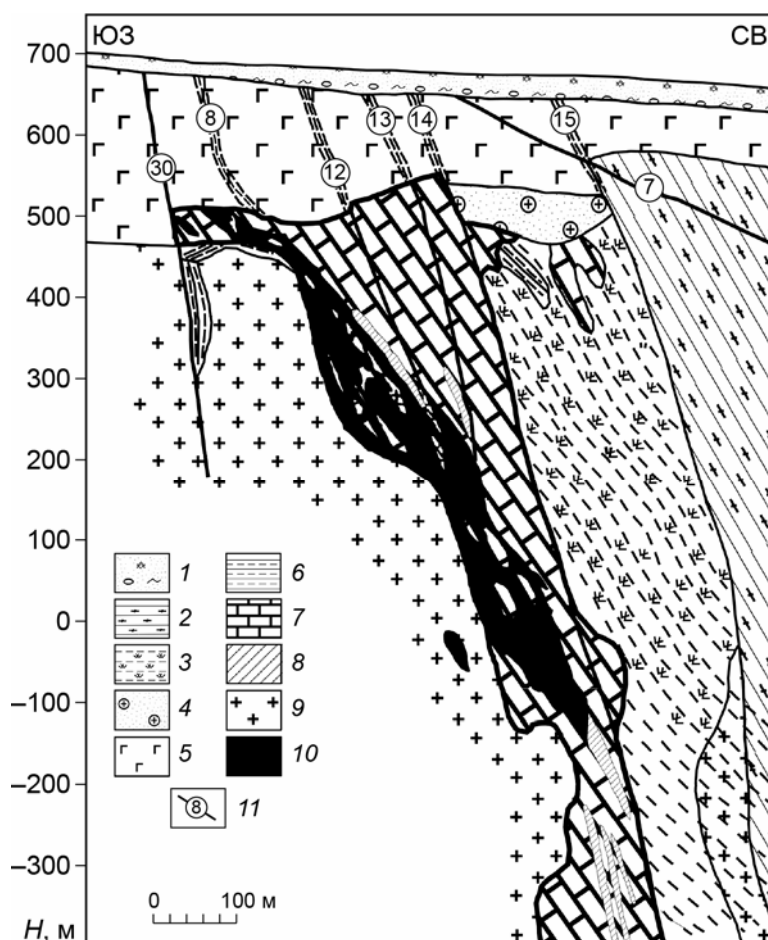


Рис. 1. Геологический разрез месторождения Аргунское (по [Ищуклова, 2007] с изменениями)

1 – рыхлые отложения; 2 – протерозойские мелкозернистые гранитогнейсы; 3 – амфиболиты и амфиболитовые сланцы; 4 – базальные конгломераты; 5 – базальты нижнего покрова и их лавовые брекчии; 6 – высокоглиноземистые кристаллические сланцы и микросланцы (андалузит-кварц-слюдистые сланцы с реликтами структур осадочных пород); 7 – доломиты, доломитизированные известняки, мергели; 8 – молибденовые залежи; 9 – средне-неравномерно-зернистые граниты интрузивно-анатектические и метасоматические с реликтами субстрата, мигматиты; 10 – урановые рудные залежи; 11 – разломы

Fig. 1. Geological section of the Argunskoye deposit (according to [Ishchukova, 2007] with changes)

1 – loose deposits; 2 – Proterozoic fine-grained granite gneisses; 3 – amphibolites and amphibolite schists; 4 – basal conglomerates; 5 – basalts of the lower cover and their lava breccias; 6 – high alumina crystalline schists and micro schists (andalusite-quartz-micaceous schists with relicts of sedimentary rock structures); 7 – dolomites, dolomitic limestones, marls; 8 – molybdenum deposits; 9 – medium-uneven-grained intrusive-anatectic and metasomatic granites with substrate relicts, migmatites; 10 – uranium ore deposits; 11 – faults

Минералого-петрографическая характеристика вмещающих пород

Крайне важно оценить влияние постмагматических, метаморфических, гидротермально-метасоматических процессов от ранних высоко-среднетемпературных (грейзенизация, калишпатизация, альбитизация, серицитизация) до поздних низкотемпературных (гидрослюдизация, аргиллизация, микропрожилкование) и деформационных (структурно-петрологических) преобразований исходных пород на характер ведущего

типа деформаций и вариации петрофизических параметров. Нередко характер и интенсивность преобразований являются определяющими при оценке петрофизических параметров, нивелируя минерально-химический состав и текстуру исходных вмещающих пород. При этом высоко-среднетемпературные (кварц, полевые шпаты, биотит, амфибол) и низкотемпературные (кварц, гидрослюда, карбонат, хлорит, каолинит, гематит и др.) минерально-деформационные преобразования (милонитизация, катаклаз, бластез, микробрекчирование и прожилкование) приводят к формированию текстур различного типа. Отмеченные закономерности выявлены на основе многолетнего детального изучения эталонных месторождений крупнейшего в России Стрельцовского урановорудного поля – Антей, Аргунское, Тулукуевское, Стрельцовское, Дальнее и Новогоднее.

Микрофотографии шлифов отобранных для исследований образцов, позволяющих оценить гетерогенность толщи пород месторождения Аргунское и различный характер минеральных и деформационных (структурно-петрологических) преобразований, показаны на рис. 2.

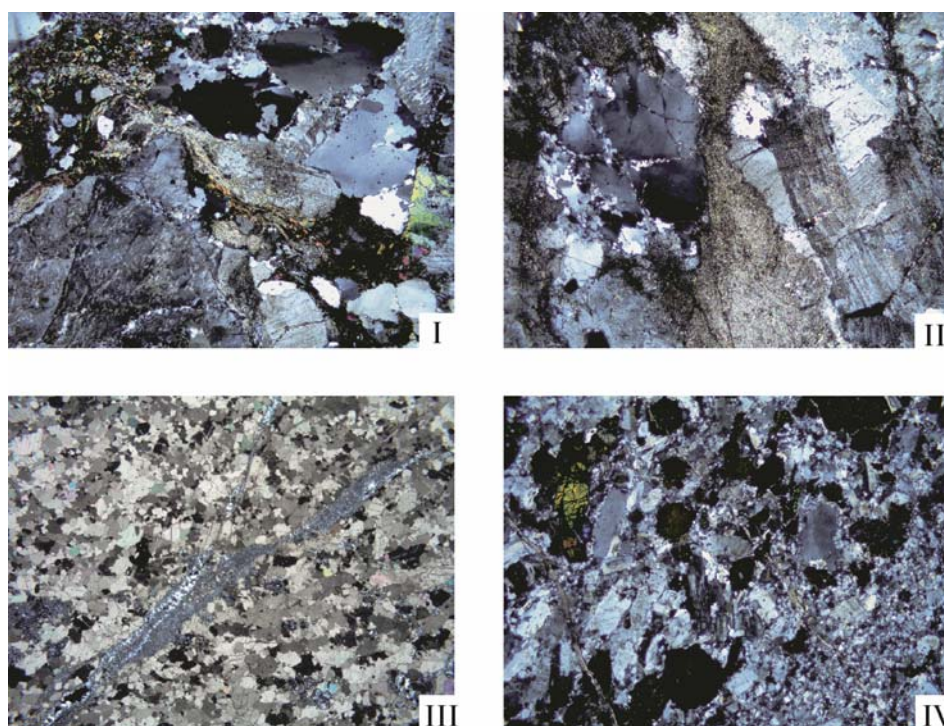


Рис. 2. Месторождение Аргунское. Шлифы вмещающих пород: I (Ар-18-1) – гидрослюдизированный и грейзенизированный средне-неравнозернистый метасоматический гранит; II (Ар-18-2) – серицитизированный средне-неравнозернистый метасоматический гранит с начальными признаками разгнейсования; III (Ар-18-3) – мраморизованный (доломитизированный) известняк с прожилково-метасоматической минерализацией; IV (Ар-18-4) – средне-мелкозернистые кварц-полевошпат-биотитовые и кварц-плагиоклаз-биотит-амфиболовые сланцы и гнейсы. Поляризаторы скрещены; длинная сторона микрофото – 2.3 мм

Fig. 2. The Argunskoye deposit. Thin sections of the host rocks: I (Ar-18-1) – hydromica and greisenized medium-uneven-grained metasomatic granite; II (Ar-18-2) – sericitized medium-uneven-grained metasomatic granite with the initial signs of disintegration; III (Ar-18-3) – Marbled (dolomitized) limestone with vein-metasomatic mineralization; IV (Ar-18-4) – Medium-fine-grained quartz-feldspar-biotite and quartz-plagioclase-biotite-amphibole schists and gneisses. The polarizers are crossed; the long side of the micrograph is 2.3 mm

Образцы Ар-18-1 и Ар-18-2 представлены метасоматическими гранитами с разной интенсивностью проявления высоко- и низкотемпературных процессов. В образце Ар-18-1 (см. рис. 2, I) наблюдаются значительные деформационно-метасоматические преобразования как высоко-среднетемпературного (кремнeshелочной метасоматоз, грей-зенезация), так и низкотемпературного (гидрослюдизация) типов. В образце Ар-18-2 (см. рис. 2, II) высоко- и низкотемпературные катакластические текстуры прослеживаются не столь ярко – здесь развит кремнeshелочной и кварц-серицитовый метасоматоз “площадного” типа (динамометаморфическая серицитизация). Низкотемпературный метасоматоз в данном образце представлен преимущественно в виде незначительной прожилково-метасоматической минерализации (гидрослюдизация).

Образец Ар-18-3 (см. рис. 2, III) – это мраморизованный (доломитизированный) известняк с редкими линзовидно-пятнистыми прослоями кварц-слюдистых сланцев, прожилково-метасоматической минерализацией и участками окварцевания.

В образце Ар-18-4 (см. рис. 2, IV) сочетаются среднезернистые кварц-полевошпат-слюдяные кристаллические сланцы и гнейсы, а также мелкозернистые гранито-гнейсы с отчетливыми гнейсовидными текстурами и порфиробластовыми структурами. Характерная особенность данного образца – преобладание высокотемпературных минеральных преобразований с развитием бластомилонитовых, бластокатаклазитовых и бластогранитовых структур. В отличие от образцов Ар-18-1 и Ар-18-2, в этом образце низкотемпературная минерализация проявлена в незначительном объеме.

Исследование пористостно-плотностных характеристик вмещающих пород

Исследования пористости и плотности образцов вмещающих пород месторождения Аргунское проводились по методике гидростатического взвешивания. При этом авторами сравнивались два способа насыщения – свободное и принудительное с использованием вакуумирования и донасыщения под давлением.

В первом случае эксперимент проходил в комнатных условиях. Сначала образцы высушивались при температуре 105–110 °С до прекращения потери веса. Затем они помещались в воду и взвешивались на весах сразу после погружения и далее по мере насыщения через 1 мин, 10 мин, 1 ч, 1 сут, 3 сут и т.д. до прекращения процесса насыщения (точность взвешивания – 10 мг). Преимущество этого метода заключается в его простоте, доступности оборудования и возможности изучения дополнительных параметров, получаемых только при постепенном насыщении и периодических измерениях (условно-мгновенное насыщение и период полунасыщения); недостаток метода – наличие в порах остаточных газов, препятствующих полному насыщению.

Принудительное насыщение с использованием вакуумирования и донасыщения под давлением позволяет полностью насытить образец, но дает возможность получить только значения его пористости и плотности. При этом необходимо дополнительное оборудование.

Цель сравнения описанных способов – определение величины расхождения между результатами, полученными при их использовании. Расчеты выполнялись по следующим формулам [Бурмистров и др., 2009]:

$$\rho = \frac{P_d}{P_d - P_{fw}} \times \rho_w, \quad (1)$$

$$\Pi_{\text{эф.}} = \frac{P_{fw} - P_{dw}}{P_d - P_{dw}} \times 100 \%, \quad (2)$$

где ρ – плотность образца, г/см³; $\rho_w=0.998$ г/см³ – плотность воды при комнатной температуре; P – вес образца, г; нижний индекс соответствует: d – сухому образцу в воздухе; dw – сухому образцу в воде; fw – полностью насыщенному образцу в воде; $\Pi_{эф.}$ – эффективная пористость образца, %.

Плотность, определяемая путем гидростатического взвешивания, приближенно соответствует естественной минеральной плотности пород. Лишь при наличии большого объема закрытых пор она может заметно отличаться от истинной минеральной плотности, но в большинстве случаев эта разница приемлемо мала [Бурмистров и др., 2009].

Результаты вычисления плотности и эффективной пористости образцов, полученные с использованием упомянутых выше методов насыщения, отображены в виде графиков на рис. 3.

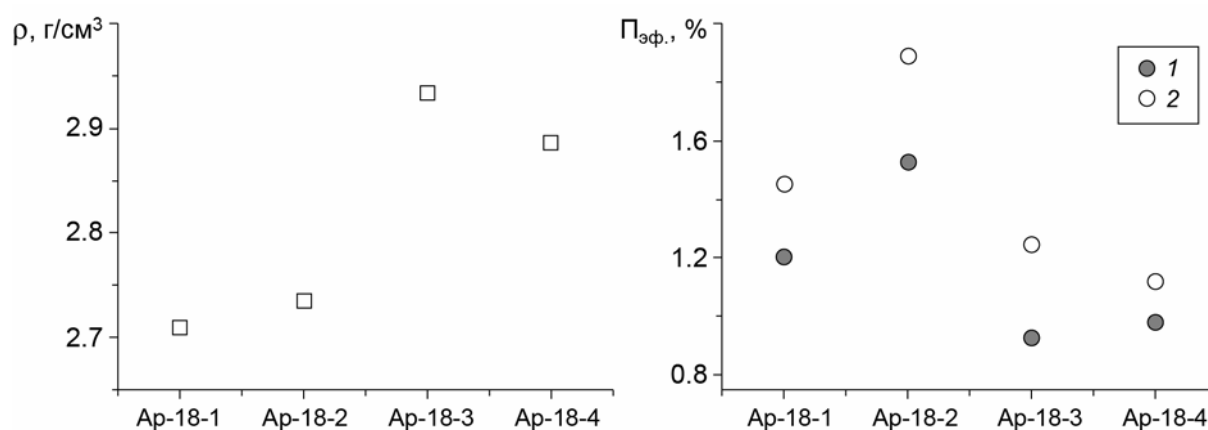


Рис. 3. Месторождение Аргунское. Графики значений плотности (слева) и эффективной пористости (справа) для четырех образцов вмещающих пород. Значения плотности получены методом принудительного насыщения, значения пористости – методами свободного (1) и принудительного (2) насыщения

Fig. 3. The Argunskoye deposit. Plots of density (left) and effective porosity (right) values for four host rock samples. Density values were obtained by forced saturation, porosity values – by free (1) and forced (2) saturation

Значения плотности ρ (см. рис. 3, слева) приведены только для метода принудительного насыщения как заведомо наиболее точные. В дальнейшем они будут использованы для вычисления механических модулей.

Можно видеть, что наибольшей плотностью $\rho=2.934$ г/см³ обладает доломитизированный известняк (образец Ap-18-3). Довольно близкие значения $\rho=2.886$ г/см³ принадлежат кристаллическому сланцу (образец Ap-18-4). Метасоматические граниты отличаются наименьшей плотностью среди изучаемых образцов – $\rho=2.71$ г/см³ (образец Ap-18-1) и $\rho=2.735$ г/см³ (образец Ap-18-2).

Закономерно, что при рассмотрении значений эффективной пористости $\Pi_{эф.}$, полученных методом свободного насыщения, наблюдается обратная зависимость (см. рис. 3, справа). Видно, что наибольшей эффективной пористостью обладают метасоматические граниты – в образцах Ap-18-1 ($\Pi_{эф.}=1.2$ %) и Ap-18-2 ($\Pi_{эф.}=1.52$ %), а доломитизированные известняки и кристаллические сланцы наименьшей – для образца Ap-18-3 $\Pi_{эф.}=0.92$ % и для образца Ap-18-4 $\Pi_{эф.}=0.98$ %. Величины эффективной пористости, вычисленные при принудительном насыщении, превышают значения $\Pi_{эф.}$,

полученные при свободном насыщении – 1.46 и 1.88 % для метасоматических гранитов, 1.24 % для доломитизированных известняков и 1.12 % для кристаллических сланцев. Однако общая закономерность в этом случае нарушается только между образцами Ар-18-3 и Ар-18-4, что является несущественным расхождением из-за различий в величине численных отклонений между значениями, рассчитанными при использовании разных способов насыщения. Для образца доломитизированных известняков эта разница составляет 0.32 %, а для кристаллических сланцев – 0.14 %.

Таким образом, можно сделать предварительный вывод о том, что при отсутствии необходимого оборудования для вакуумирования и нагнетания давления можно использовать свободное насыщение без существенных потерь в точности получаемых результатов. Следует отметить, что данный вопрос требует отдельного рассмотрения с привлечением более представительной коллекции образцов.

В то же время тот факт, что метасоматические граниты гораздо менее плотные и более пористые, чем доломитизированные известняки, находит свое подтверждение на разрезе месторождения Аргунское (см. рис. 1), где видно, что доломитизированные известняки служили барьером на пути движения рудоносных растворов в процессе рудообразования.

Исследование упругих свойств образцов горных пород при атмосферных условиях

Существующие методы определения упругих свойств горных пород можно разделить на статические и динамические. Статические методы основаны на измерении деформаций образцов исследуемых пород под нагрузкой, а динамические – на измерении скоростей упругих волн, возбуждаемых в образцах в диапазоне звуковых и ультразвуковых частот.

Наибольшее распространение в практике изучения упругих свойств горных пород получил импульсный динамический метод, при котором через рассматриваемый образец пропускаются повторяющиеся импульсы ультразвуковых колебаний и по значениям скоростей их распространения рассчитываются упругие характеристики. Определение этим методом акустических, а затем и упругих свойств обычно проводится путем прямого прозвучивания. В зависимости от оборудования можно работать как на прямых, так и на отраженных волнах.

Для прозвучивания образца с помощью прямых волн к одной точке прижимают ультразвуковой излучатель, а к другой – приемник (кристаллы кварца, сегнетовой соли, керамика титаната бария, магнитострикционные преобразователи и др.); скорость упругой волны на выбранной трассе получают, разделив расстояние между двумя точками на время пробега.

При работе на отраженных волнах излучатель используется уже как приемник, регистрируя волны, отраженные от противоположной поверхности образца. Следует заметить, что значения модуля упругости, определяемые динамическими методами, обычно несколько выше, чем получаемые при статических измерениях. Это расхождение обусловлено неидеальной упругостью пород; оно минимально для плотных разновидностей и возрастает по мере снижения плотности пород.

Используя значения плотности образцов, полученные путем гидростатического взвешивания, по формулам, представленным в [Бурмистров и др., 2009], были вычислены следующие упругие характеристики горных пород:

$$K = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right); \quad (3)$$

$$G = \rho V_S^2; \quad (4)$$

$$E = \rho V_S^2 \frac{3V_P^2 - 4V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} = \frac{G}{2} \frac{3V_P^2 - 4V_S^2}{V_P^2 - V_S^2}; \quad (5)$$

$$\mu = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)}. \quad (6)$$

Здесь K – модуль объёмной упругости или модуль объёмного сжатия, ГПа; V_P – скорость продольных волн, км/с; V_S – скорость поперечных волн, км/с; G – модуль сдвига, ГПа; E – модуль Юнга, ГПа; μ – коэффициент Пуассона.

Для изучения механических свойств вмещающих пород месторождения Аргунское были выбурены цилиндрические образцы двух видов – диаметром 30 мм с высотой 60 мм и диаметром 100 мм с высотой от 88 до 106.5 мм в зависимости от размера штуфа. Для всех образцов (кроме Ар-18-1) было изготовлено по два цилиндра каждого вида; для образца Ар-18-1 из-за малых размеров штуфа было изготовлено по одному цилиндру каждого вида.

Измерения скоростей упругих волн при нормальных условиях проводились в соответствии с ГОСТ 21153.7–75 при помощи комплекта аппаратуры, состоящего из генератора-приемника ультразвуковых сигналов “Olympus 5072 PR” (производство США) и пар датчиков P - и S -волн “Panametrics” (производство США). Каждый датчик может быть использован и как источник, и как регистратор упругих колебаний.

Поскольку для измерения скоростей объёмных волн необходимо, чтобы на трассе зондирования укладывалось не менее 5 длин волн, для исследования цилиндрических образцов диаметром 100 мм применялись датчики с собственной частотой колебаний 1 МГц, для образцов диаметром 30 мм – 5 МГц.

Датчики P -волн генерировали и регистрировали смещения перпендикулярные поверхности датчика, датчики S -волн – линейно поляризованные смещения вдоль поверхности датчика. Сигнал с датчика-регистратора подавался на вход приемного усилителя и перенаправлялся на цифровой осциллограф “TiePie508” (Нидерланды), с помощью которого регистрируемые волновые формы преобразовывались в цифровой вид и сохранялись в файлах на жестком диске управляющего компьютера.

Начало регистрации волновой формы синхронизировалось с началом импульсного сигнала. При измерениях во времена вступления волн вносилась необходимая поправка на конечность скорости реакции датчиков. Для определения временной поправки перед каждой серией измерений выполнялись контрольные измерения времени распространения волны в системе датчик–датчик. Время реакции датчика определялось как время вступления регистрируемого сигнала. Для улучшения контакта между датчиками и поверхностью образца для смазки применялся гель полисахаридов. Для подавления помех регистрация велась с накоплением не менее 64 повторяющихся импульсов.

Ниже приведены результаты ультразвуковых наблюдений при определении усредненных значений скоростей P - и S -волн (рис. 4), динамических модулей и коэффициента Пуассона (рис. 5) для образцов вмещающих пород.

Можно видеть, что наименьшие значения скоростей продольных и поперечных волн отмечены для метасоматических гранитов (см. рис. 4): для образца Ар-18-1 – $V_P=5.38$ км/с, $V_S=2.95$ км/с; для образца Ар-18-2 – $V_P=5.10$ км/с, $V_S=3.37$ км/с.

Кристаллическим сланцам и гнейсам, напротив, присущи наибольшие скорости – значения V_P для образца Ар-18-4 лежат в диапазоне от 6.12 до 6.41 км/с, значения V_S – в диапазоне от 3.4 до 3.6 км/с.

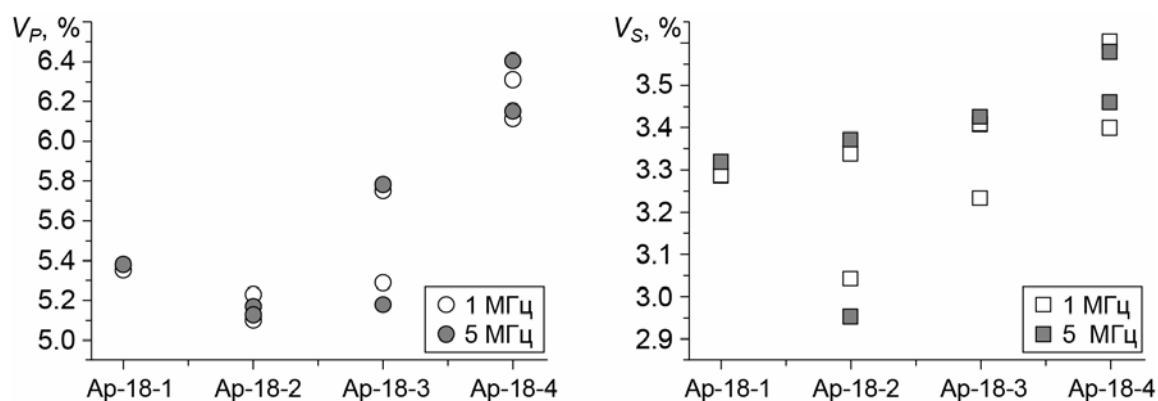


Рис. 4. Месторождение Аргунское. Скорости ультразвуковых продольных волн V_p , км/с (слева) и поперечных волн V_s , км/с (справа), определенные на образцах вмещающих пород

Fig. 4. The Argunskoye deposit. Velocities of ultrasonic longitudinal waves V_p , km/s (left) and transverse waves V_s , km/s (right) defined on the host rock samples

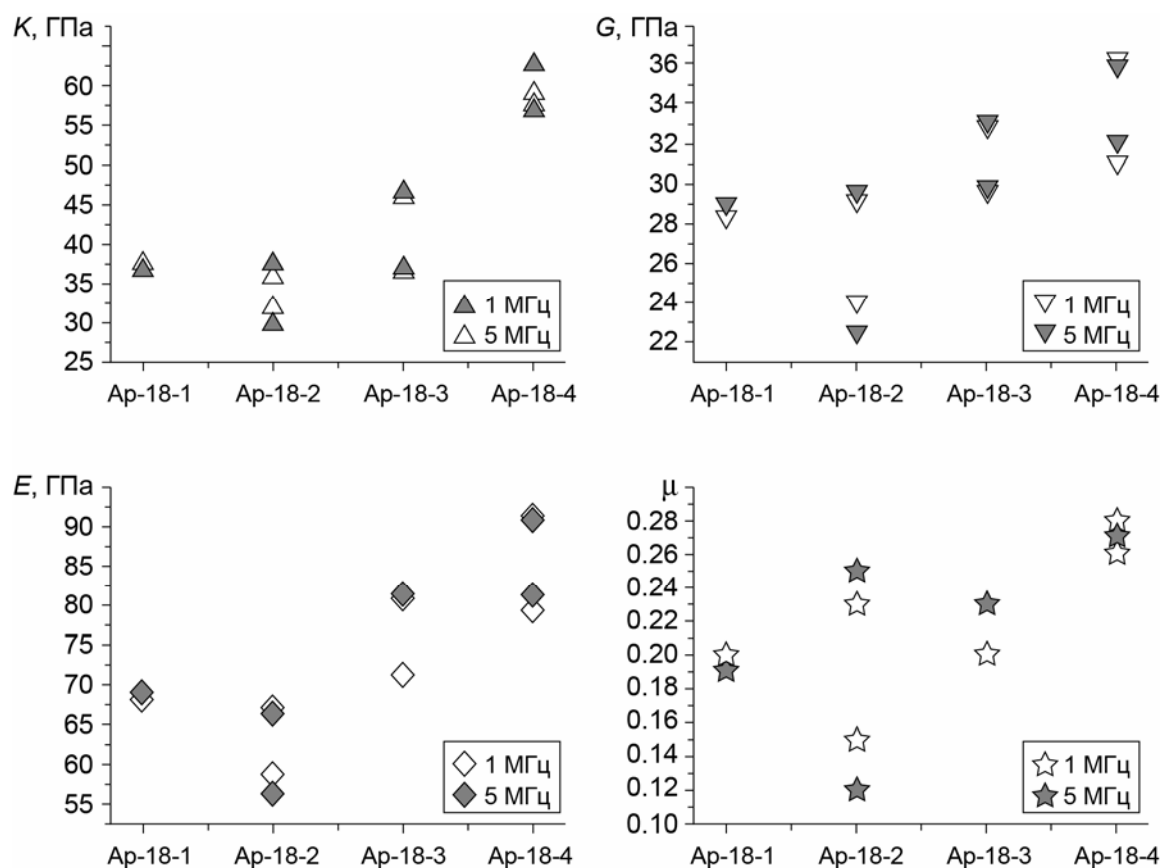


Рис. 5. Месторождение Аргунское. Значения модуля объемного сжатия K , ГПа (вверху слева), модуля сдвига G , ГПа (вверху справа), модуля Юнга E , ГПа (внизу слева) и коэффициента Пуассона μ (внизу справа) образцов вмещающих пород

Fig. 5. The Argunskoye deposit. The values of the bulk modulus K , GPa (above left), shear modulus G , GPa (above right), Young's modulus E , GPa (below left) and Poisson's ratio μ (below right) of host rock samples

Скорости, измеренные в мраморизованном (доломитизированном) известняке занимают промежуточное положение. Закономерно, что соотношения значений динамических модулей и коэффициента Пуассона для разных образцов в целом совпадают с картиной, полученной при исследовании скоростей ультразвуковых волн в образцах вмещающих пород месторождения Аргунское (см. рис. 5).

По результатам исследования упругих свойств образцов в атмосферных условиях можно сделать вывод, что среди изучаемых пород месторождения Аргунское кристаллические сланцы и гнейсы наиболее массивны и устойчивы к механическому воздействию, а доломитизированные известняки и, в большей степени, метасоматические граниты, напротив, пористые и механически ослабленные. Повышенная пористость и трещиноватость вмещающих пород создают благоприятные условия для циркуляции рудоносных растворов. Данный вывод находит подтверждение при рассмотрении геологического разреза месторождения Аргунское (см. рис. 1), на котором видно, что богатые урановорудные залежи заключены в массивах гранитов и доломитизированных известняков, в то время как сланцы безрудны.

Геомеханические испытания

Геомеханические испытания образцов керна, выбуренного из штуфов, проводились в Центре петрофизических и геомеханических исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук в соответствии с мировыми методическими стандартами [Ulusay, Hudson, 2007; Ulusay, 2015]. В рамках данной работы на образцах проводились многостадийные испытания, включая ультразвуковое зондирование при значениях давления от 6 до 24 МПа (с шагом 6 МПа) и разных радиальных напряжениях. Частота зондирования – каждые 30 с. Использовались сервогидравлическая испытательная установка высокого давления GCTS RTR-4500 для создания термобарических условий и выполнения механического нагружения (рис. 6); система GCTS-ULT 100 для регистрации скоростей продольных и поперечных волн вдоль оси образца в термобарических условиях.

В результате проведенных испытаний были выявлены следующие закономерности. При рассмотрении зависимости скорости продольных волн от осевого напряжения P_a (рис. 7, слева) отчетливо видно, что на повышение P_a наиболее ярко реагирует образец Ар-18-3 – мраморизованный (доломитизированный) известняк. При изменении давления от 0 до 50 МПа происходит резкое увеличение скоростей ультразвуковых волн от 5.8 до 6.8 км/с, после чего они плавно возрастают до 7.3 км/с. Для остальных образцов наблюдаются более спокойные тренды. Эти данные указывают на то, что доломитизированные известняки в своей микро- и макроструктуре имеют большое количество пор, каналов и трещин, которые благодаря хрупкости породы, начинают быстро закрываться под действием повышающегося давления.

Кроме того, при изучении поведения скоростей ультразвуковых волн становится очевидной разница в значениях скоростей между изучаемыми породами. Образцам Ар-18-1 и Ар-18-2, представленным метасоматически проработанным гранитом, соответствуют значения скоростей продольных волн в диапазоне от 5.1 до 5.8 км/с при вариациях осевого давления от 0 до 300 МПа. В доломитизированном известняке (образец Ар-18-3) скорости изменяются от 5.1 до 7.3 км/с. Кварц-полевошпат-слюдяные кристаллические сланцы и гнейсы (образец Ар-18-4), отличаются наиболее высокой начальной скоростью продольных волн – 5.8 км/с, а также наименьшей вариацией скоростей (до 6.2 км/с) при увеличении давления.

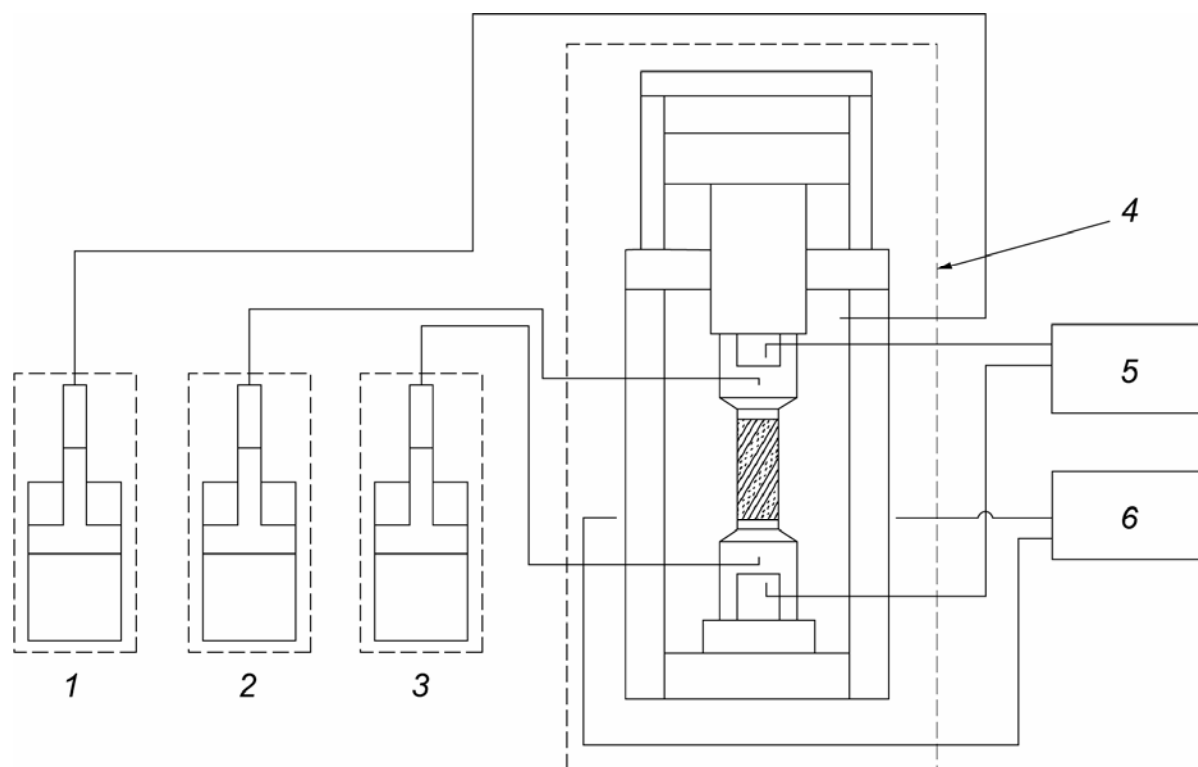


Рис. 6. Схема сервогидравлической испытательной установки

1 – усилитель всестороннего давления; 2, 3 – усилители порового давления; 4 – манипулятор осевой; 5 – контроллер ультразвуковой; 6 – контроллер температуры

Fig. 6. Scheme of the servo-hydraulic test installation

1 – confining pressure amplifier; 2, 3 – pore pressure amplifiers; 4 – axial manipulator; 5 – ultrasonic controller; 6 – temperature controller

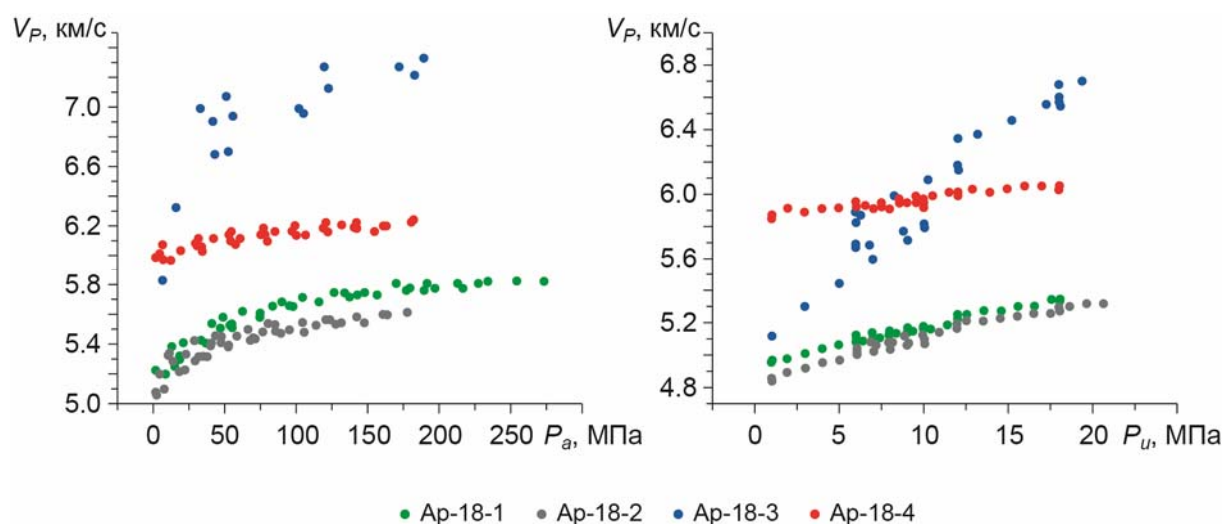


Рис. 7. Графики зависимости скорости продольных волн V_P , км/с от осевого давления P_a , МПа (слева) и всестороннего давления P_u , МПа (справа)

Fig. 7. Plots of the dependence of the velocity of longitudinal waves V_P , km/s on the axial pressure P_a , MPa (left) and confining pressure P_u , MPa (right)

Отмеченное говорит о том, что кварц-полевошпат-слюдяные кристаллические сланцы и гнейсы являются наиболее плотными и механически однородными среди изучаемых пород. Аналогичная картина наблюдается и при рассмотрении зависимости скорости продольных волн V_P от всестороннего давления P_u (рис. 7, *справа*).

В результате статических испытаний было установлено, что образец Ар-18-1 обладает наибольшим пределом прочности $\sigma=389.1$ МПа при максимальном всестороннем давлении (рис. 8). Значения σ , полученные для мраморизованного (доломитизированного) известняка и метасоматических гранитов, занимают промежуточную позицию – $\sigma=321.1$ МПа для образца Ар-18-3 и $\sigma=235.4$ МПа для образца Ар-18-2. Образец Ар-18-4 не выдержал испытания на этапе приложения всестороннего давления в 24 МПа. Таким образом, кварц-полевошпат-слюдяные кристаллические сланцы и гнейсы обладают наименьшим пределом прочности, а два образца метасоматически измененных гранитов сильно отличаются друг от друга.

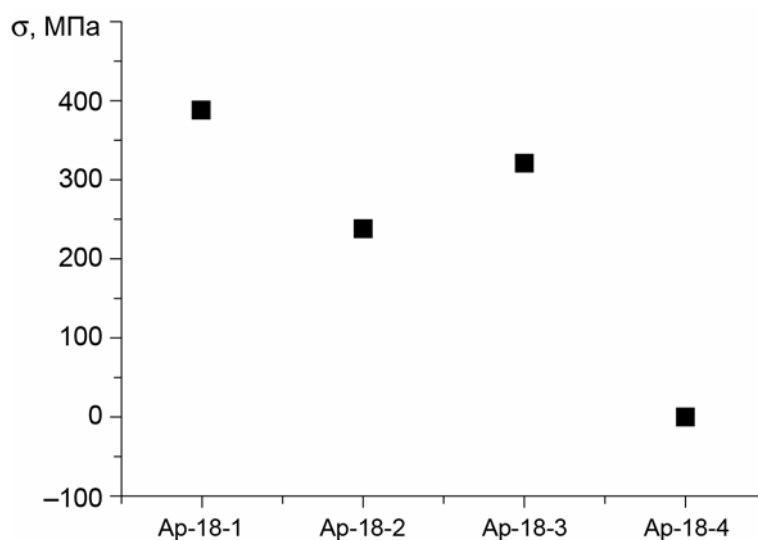


Рис. 8. График предела прочности σ , МПа исследованных образцов вмещающих пород при максимальном значении всестороннего давления $P_a=24$ МПа

Fig. 8. Plot of the ultimate strength σ , MPa of the host rock samples at the maximum value of the confining pressure $P_a=24$ MPa

Предположительно, данная ситуация объясняется тем, что наиболее устойчивый образец Ар-18-1 был подвергнут интенсивным метасоматическим преобразованиям как высоко- и среднетемпературного (кремнещелочной метасоматоз, грейзенозация), так и низкотемпературного типа (гидросланцизация), в то время как в образце Ар-18-2 метасоматические преобразования не получили широкого развития [Минаев и др., 2019]. Различия в механическом поведении вмещающих гранитоидов месторождения Аргунское могут быть обусловлены и геодинамическими факторами, а именно, вертикальной миграцией границы перехода от упруго-хрупкого к упруго-пластичному поведению вещества на более глубокие горизонты при внедрении новой порции магматических расплавов или при новой фазе тектогенеза [Петров, Андреева, Полуэктов, 2014].

На месторождении Аргунское данная закономерность проявилась наиболее ярко – в его пределах было отмечено сочетание минеральных преобразований с пластическими и хрупкими деформациями.

Заключение

Результаты, полученные в процессе изучения образцов вмещающих пород месторождения Аргунское, позволяют сделать следующие выводы.

1. Исследуемые образцы мраморов, гранитов, кристаллических сланцев и гнейсов, различаются как по характеру и интенсивности минеральных и деформационных преобразований, так и по петрофизическим свойствам и геомеханическим характеристикам. При этом доломитизированные известняки, максимально контрастные по составу и свойствам с гранитами и гнейсами, могут выступать в роли геохимического барьера на пути фильтрации рудоносных растворов, способствуя осаждению рудных компонентов.

2. В ходе динамических испытаний выявлено, что доломитизированные известняки в своей микро- и макроструктуре имеют большое количество пор, каналов и трещин, которые из-за хрупкости породы начинают быстро закрываться под действием повышающегося давления. Наряду с этим, кварц-полевошпат-слюдяные кристаллические сланцы и гнейсы, характеризующиеся преобладанием высокотемпературных blasto-mylonitic и cataclastic структур и практически отсутствием низкотемпературной минерализации, являются наиболее плотными и механически однородными среди изученных разностей пород.

3. Статические испытания показали, что кварц-полевошпат-слюдяные кристаллические сланцы и гнейсы обладают наименьшим пределом прочности, а два образца метасоматических гранитов сильно отличаются друг от друга. Последнее предположительно связано с различным характером и интенсивностью проявления высоко- и низкотемпературных метасоматических преобразований и соответствующих катакластических текстур, а также с изменением напряженно-деформированного состояния в разрезе массива пород на различных этапах тектогенеза.

Таким образом, показано влияние характера и интенсивности минеральных и деформационных (структурно-петрологических) преобразований вмещающих пород на их физические свойства. Для дальнейшей верификации петрофизических параметров необходимо детальное изучение более представительной коллекции пространственно-ориентированных образцов месторождения Аргунское.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-05-00673).

Литература

- Бурмистров А.А., Старостин В.И., Дергачев А.Л., Петров В.А. Структурно-петрофизический анализ месторождений полезных ископаемых. М.: Изд-во МАКС Пресс, 2009. 408 с.
- Ищукова Л.П. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. Иркутск: Типография "Глазовская", 2007. 260 с.
- Минаев В.А., Устинов С.А., Нафигин И.О., Петров В.А., Полуэктов В.В., Фокин И.В., Егоров Н.А. Геомеханическая характеристика вмещающих пород месторождения Аргунское // Двадцатая международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле". М.: ИГЕМ РАН, 2019. С.230–234.
- Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В. Влияние петрофизических свойств и деформаций пород на вертикальную зональность метасоматитов в ураноносных вулканических структурах (на примере Стрельцовской кальдеры, Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56, № 2. С.95–117.

- Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: утверждены Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 декабря 2013 года № 599 “Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности” // Рос. газ. 2018. 18 декабря.
- Bourne B., Dentith M., Jumeau A.* Petrophysics and Exploration Targeting: The Value Proposition // ASEG Extended Abstracts. 2018. N 1. P.1–5.
- Gupta V., Sharma R.* Relationship between textural, petrophysical and mechanical properties of quartzites: A case study from northwestern Himalaya // Engineering Geology. 2012. V. 135. P.1–9.
- Kibikas W., Carpenter B., Ghassemi A.* The Petrophysical and Mechanical Properties of Oklahoma's Crystalline Basement // 53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, 2019. 9 p.
- Kitzig M.C., Kepic A.* Automatic Classification of Iron Ore Lithologies Using Petrophysical and Geochemical Data // Near Surface Geoscience 2016 – First Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining. European Association of Geoscientists & Engineers. 2016. N 1. P.1–5.
- Launay G., Sizaret S., Guillou-Frottier L., Fauguerolles C., Champallier R., Gloaguen E.* Dynamic permeability related to greisenization reactions in Sn-W ore deposits: Quantitative petrophysical and experimental evidence // Geofluids. 2019. P.1–23.
- Paul S., Okwueze E., Udo K.* Petrophysical analysis of well logs for the estimation of oil reserves in Southern Niger Delta // International Journal of Advanced Geosciences. 2018. V. 6, N 1. P.140–145.
- Rashid F., Hussein D.O., Zangana H.A.* Petrophysical Investigation of the Khurmala Formation in Taq Taq Oil Field, Zagros Folded Belt // ARO-the scientific journal of Koya university. 2020. V. 8, N 1. P.5–16.
- Ulusay R.* The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. Springer, 2015. 280 p.
- Ulusay R., Hudson J.A.* The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006. Ankara: Int. Soc. Rock Mech., 2007. 628 p.

Сведения об авторах

МИНАЕВ Василий Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, руководитель группы подготовки научно-педагогических кадров (заведующий аспирантурой), Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35; ведущий инженер, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН. 111020, Москва, Крюковский туп., д. 4. Тел.: +7(499) 230-84-16. E-mail: minaev2403@mail.ru

УСТИНОВ Степан Андреевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора по научной работе, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35; старший преподаватель, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе. 117485, Москва ул. Миклухо-Маклая, д. 23. Тел.: +7(499) 230-84-16. E-mail: stevesa@mail.ru

НАФИГИН Игорь Олегович – младший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35. Тел.: +7(499) 230-84-16. E-mail: estera-st@mail.ru

ПЕТРОВ Владислав Александрович – доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, директор, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35; профессор, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9. Тел.: +7(499) 230-82-25. E-mail: vlad243@igem.ru

ПОЛУЭКТОВ Валерий Викторович – старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35. Тел.: +7(499) 230-82-25. E-mail: vapol@igem.ru

ФОКИН Илья Владимирович – заведующий Центром петрофизических и геомеханических исследований, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-90-42. E-mail: fokin@ifz.ru

ЕГОРОВ Николай Александрович – ведущий инженер Центра петрофизических и геомеханических исследований, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-90-42. E-mail: nikolay.egorov@ifz.ru

GEOMECHANICAL AND PETROPHYSICAL PARAMETERS OF THE HOSTING ROCKS OF ARGUNSKOE DEPOSIT

V.A. Minaev^{1,5}, S.A. Ustinov^{1,2}, I.O. Nafigin¹, V.A. Petrov^{1,3}, V.V. Poluektov¹,
I.V. Fokin⁴, N.A. Egorov⁴

¹ *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russia*

³ *D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

⁴ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

⁵ *Institute of Complex Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Abstract. By 2023, it is planned to begin development of the Argunskoe deposit, which includes in its bowels up to 35 % of the uranium reserves of the Streltsovskoe ore field in East Transbaikalia. The complex geological and structural structure of the Argunskoe deposit and the exceptional heterogeneity of the host rock stratum, represented by granitoids, gneisses, crystalline schists, syenite-porphyry, marbled limestones, basalts and others, necessitate the identification of the physicommechanical properties of the host rocks to ensure safety and optimization of mining operations, as well as identifying patterns of localization of ore bodies. Significantly complicates the picture is a wide range of post-magmatic, hydrothermal-metasomatic and deformational transformations of rocks of various genesis. Samples of the host rocks of the Argunskoye deposit massif located near the ore bodies were taken. Their porosity and density properties were determined, elastic parameters were studied, and geomechanical tests were carried out in conjunction with mineralogical and petrographic study of rocks. In particular, the nature and intensity of mineral and deformation (structural-petrological) transformations are determined. Differences in the composition and properties of the host rocks were identified, petrophysical characteristics of the rocks, which may be important for the further exploitation of the Argunskoe deposit, were recorded. The research results suggested that dolomitic limestones, which are in maximum contrast with granites and gneisses, can act as a geochemical barrier to the filtration of ore-bearing solutions, contributing to the deposition of ore components. The influence of the nature and intensity of mineral and deformation (structural-petrological) transformations of rocks on their physical properties is shown.

Keywords: geomechanics, petrophysics, uranium deposit, ultrasound.

References

- Bourne B., Dentith M., Jumeau A., *Petrophysics and Exploration Targeting: The Value Proposition, ASEG Extended Abstracts*, 2018, no. 1, pp. 1-5.
- Burmistrov A.A., Starostin V.I., Dergachev A.L., Petrov V.A., *Strukturno-petrofizicheskij analiz mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh* (Structural and petrophysical analysis of mineral deposits), Moscow: MAKSS Press, 2009, 408 p. [in Russian].
- Gupta V., Sharma R., Relationship between textural, petrophysical and mechanical properties of quartzites: A case study from northwestern Himalaya, *Engineering Geology*, 2012, vol. 135, pp. 1-9.

- Ishchukova L.P., *Uranovye mestorozhdeniya Strel'tsovskogo rudnogo polya v Zabajkal'e* (Uranium deposits of the Strel'tsovsky ore field in Transbaikalia), Irkutsk: Glazovskaya Printing House, 2007, 260 p. [in Russian].
- Kibikas W., Carpenter B., Ghassemi A., The Petrophysical and Mechanical Properties of Oklahoma's Crystalline Basement, *53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association*, 2019, 9 p.
- Kitzig M.C., Kopic A., Automatic Classification of Iron Ore Lithologies Using Petrophysical and Geochemical Data, *Near Surface Geoscience 2016 – First Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining. European Association of Geoscientists & Engineers*, 2016, no. 1, pp.1-5.
- Launay G., Sizaret S., Guillou-Frottier L., Fauguerolles C., Champallier R., Gloaguen E., Dynamic permeability related to greisenization reactions in Sn-W ore deposits: Quantitative petrophysical and experimental evidence, *Geofluids*, 2019, pp. 16-20.
- Minaev V.A., Ustinov S.A., Nafigin I.O., Petrov V.A., Poluektov V.V., Fokin I.V., Egorov N.A., Geomechanical characteristics of the host rocks of the Argunskoe deposit, *The twentieth international conference "Physical-chemical and petrophysical researches in Earth's sciences"*, Moscow: IGEM RAS, 2019, pp. 230-234.
- Paul S., Okwueze E., Udo K., Petrophysical analysis of well logs for the estimation of oil reserves in Southern Niger Delta, *International Journal of Advanced Geosciences*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 140-145.
- Petrov V.A., Andreeva O.V., Poluektov V.V., Effect of petrophysical properties and deformation on vertical zoning of metasomatic rocks in U-bearing volcanic structures: A case of the Strel'tsovka caldera, Transbaikalian region, *Geology of Ore Deposits*, 2014, vol. 56, no. 2, pp. 81-100.
- Pravila bezopasnosti pri vedenii gornyh rabot i pererabotke tverdyh poleznykh iskopaemykh: utverzhdeny Prikazom federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskemu i atomnomu nadzoru ot 11 dekabrya 2013 goda № 599 "Ob utverzhdenii Federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoj bezopasnosti"* (Safety rules for mining and processing of solid minerals: approved by Order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision of December 11, 2013 No. 599 "On the Approval of Federal Standards and Rules in the Field of Industrial Safety"), Ros. gaz., 2018, December 18. [in Russian].
- Rashid F., Hussein D.O., Zangana H.A., Petrophysical Investigation of the Khurmala Formation in Taq Taq Oil Field, Zagros Folded Belt, *ARO-the scientific journal of Koya university*, 2020, vol. 8, no. 1, pp. 5-16.
- Ulusay R., Hudson J.A., *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006*, Ankara: Int. Soc. Rock Mech., 2007, 628 p.
- Ulusay R., *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014*, Springer, 2015, 280 p.