

Проведенный сравнительный анализ критериев и признаков уранового, золото-уранового оруденения (табл. 1), в частности, характер и последовательность проявления гидротермально-метасоматических преобразований пород, рудный парагенезис, состав и характер проявления урановой и ассоциированной с ней золотой минерализации Пана-Куоляярвинской структуры в целом сопоставимы с таковыми для поясов Куусамо и Парапохиа сопредельной Финляндии, вмещающих такие известные месторождения как Юомасуо, Пахтаваара, проявления группы Ромпас, что выдвигает эту территорию в разряд перспективных на обнаружение золотого и золото-уранового оруденения.

В результате комплексного анализа всего объема данных проведена прогнозная оценка территории с выделением площадей, обладающих лицензионной привлекательностью и требующих постановки в их пределах крупномасштабных поисковых работ (рис. 2). Для этих площадей была проведена оценка прогнозных ресурсов на золото по кат. P₃ по методу аналогий (Е.Н. Афанасьева и др., 2004 г.). По совокупности критериев и признаков золотого оруденения наиболее перспективной на золото является Нилуттиярвинская площадь (70 км²), объединяющая известные рудопроявления урана Озерное, Лагерное, Алакуртти и др. Прогнозные ресурсы золота по кат. P₃ для Нилуттиярвинской площади оценены в 19 т (Е.Н. Афанасьева и др. 2004), урана (для всего Куоляярвинского прогиба) в 69 т (ГП «Невскгеология, 1999). Нилуттиярвинская площадь характеризуется интенсивным проявлением гидротермально-метасоматических преобразований пород (альбитизации, последующего брекчирования, карбонатизации, окварцевания), наличием рудопроявлений урана, в которых в пределах рудных зон установлены аномальные и рудные содержания золота, близостью структурно-вещественных обстановок локализации рудных объектов с месторождениями и проявлениями пояса Куусамо, а также на золото-урановых проявлениях группы Ромпас, что дает основание достаточно высоко оценить перспективы площади на выявление золоторудных объектов. При этом золоторудные концентрации могут быть связаны как с ураноносными альбит-карбонатными метасоматитами, так и с кварц-сульфидными жилами. Есть основание предполагать, что формирование урановых и связанных с ними золоторудных концентраций является результатом проявления единого многостадийного рудоформирующего процесса, обусловленного переносом и концентрацией рудного вещества в единых рудоносных зонах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьева, Е.Н. Структурная зональность протерозоид Карелии: Автореф. канд. диссертации / Е.Н. Афанасьева. — СПб., 1996. — 21 с.
2. Афанасьева, Е.Н. Комплексное золотоурановое оруденение восточной части Балтийского щита / Е.Н. Афанасьева, Ю.Б. Миронов // Золото Фенноскандинавского щита: Матер. междунар. конф. — 2013. — С. 9–12.
3. Афанасьева, Е.Н. Металлогения урана Балтийского щита / Е.Н. Афанасьева, Ю.Б. Миронов // Уран: геология, ресурсы, производство: Тезисы третьего междунар. симпозиума. — М., 2013. — С. 21–23.
4. Коровкин, В.А. Недрa Северо-Запада Российской Федерации / В.А. Коровкин, Л.В. Турылева, Д.Г. Руденко и др. — СПб., 2003. — 461 с.

5. Минц, М.В. Ранний докембрий северо-востока Балтийского щита: палеогеодинамика, строение и эволюция континентальной коры / М.В. Минц, В.Н. Глазнев, А.Н. Конилов и др. — М., 1996. — 277 с.
6. Ferenc, Molnar Association of gold with uraninite and pyrobitumen in the metavolcanic rock hosted hydrothermal Au-U mineralization at Rompas, Perapohja Schist Belt, Northern Finland / Molnar Ferenc, Oduro Harry, Nick D.J. Cook // Miner Deposita. — № 51. — P. 681–702.
7. Korhikoski, E. 1992. Geology and geochemistry of the metakomatiite-hosted Pahtavaara gold deposit in Sodankylä, Northern Finland, with emphasis on hydrothermal alteration / E. Korhikoski / Geological Survey of Finland, Bulletin 360. 96.
8. Mironov, Yu. Gold-Uranium mineralization in the Kuusamo-Paanajarvi Ore District (Fennoscandian Shield) / Yu. Mironov, E. Afanaseva / Mineral resources in a sustainable world. 13th SGA Biennial Meeting. Nancy, 2015. — 1843–1845.
9. Pankka, Y. Early Proterozoic Au-Ce-U mineralization in the Kuusamo district, North-Eastern Finland / Y. Pankka, E. Vanhanen / Precambrian Research, 58. — H. 387–400.
10. Pohlolainen, E. Norm-related Mineral Development in Finland / E. Pohlolainen, H. Tuovinen, Sorjonen-Ward P. — 2016.
11. Vanhanen, E. Geology, mineralogy and geochemistry of the Fe-Co-Au (U) deposits in the Paleoproterozoic Kuusamo Shield Belt, North-Eastern Finland / E. Vanhanen — 2001. — 227 p.

© Афанасьева Е.Н., Миронов Ю.Б., 2017

Афанасьева Елена Николаевна // Elena_Afanasyeva@vsegei.ru
Миронов Юрий Борисович // Yuri_Mironov@vsegei.ru

УДК 550.83.04:550.812:553.078

**Петров В.А., Минаев В.А., Устинов С.А.,
Полуктов В.В., Андреева О.В. (ИГЕМ РАН)**

ОЦЕНКА ПУТЕЙ И ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МИГРАЦИИ РУДОНОСНЫХ РАСТВОРОВ МЕТОДАМИ СТРУКТУРНОЙ ПЕТРОФИЗИКИ И МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

*С точки зрения фундаментальных и прикладных аспектов геологической науки и практики одной из наиболее важных задач является реконструкция пространственно-временной связи между деформациями массивов пород, их флюидной проницаемостью и минералообразованием в трещинно-поровом объеме зоны рудоотложения. В связи с этим возникает необходимость разработки новых подходов к установлению целого ряда параметров, определяющих динамику протекания процессов мобилизации, переноса, отложения и переотложения рудного вещества. **Ключевые слова:** гранитоиды, месторождение урана, флюидные потоки, гидротермальные растворы, петрофизический анализ, микроструктурный анализ.*

Petrov V.A., Minaev V.A., Ustinov S.A., Poluektov V.V., Andreeva O.V. (IGEM RAS)

EVALUATION OF WAYS AND FLUIDODYNAMIC CONDITIONS OF MIGRATION OF ORE-SOLUBLE SOLUTIONS BY STRUCTURAL PETROPHYSICS AND MICROSTRUCTURE ANALYSIS

From the position of fundamental and applied aspects of geological science and practice, one of the most important task is the reconstruction of the space-time relationship between deformations of rock massifs, their fluid permeability and mineral formation in the fractured-pore volume of the ore deposition zone. In this regard, there is a need to develop new

approaches for establishing of a number of parameters that determine the dynamics of the processes of mobilization, transport, deposition and redeposition of ore matter. **Keywords:** granitoids, uranium deposit, fluid flows, hydrothermal solutions, petrophysical analysis, microstructural analysis.

Вопрос о причинах и закономерностях движения гидротермальных растворов был сформулирован как один из важнейших в теории и практике учения о рудных месторождениях еще в середине прошлого века (А.Г. Бетехтин и др., 1953) [2]. В главе «О причинах движения гидротермальных растворов» (с. 453–475) этого выдающегося научного труда сказано, что данный «... вопрос должен привлечь серьезное внимание наших геологов, изучающих рудные месторождения. Мы вообще должны добиваться реальных представлений о причинах и направлениях перемещения рудоносных растворов, так как они имеют очень важное значение для решения ряда практических задач, связанных с освоением рудных месторождений, особенно при рациональном направлении поисково-разведочных работ».

Эти слова не потеряли актуальности и в настоящее время в связи с необходимостью совершенствования методов прогнозирования и поиска «скрытого» оруденения.

В настоящее время не существует утвержденного алгоритма исследований, который бы позволил наверняка определять пути движения рудоносных растворов и флюидодинамические обстановки рудообразования.

В статье авторы подходят к решению данного вопроса посредством изучения физических свойств образцов горных пород с помощью методов структурной петрофизики, а также детального изучения микроструктурных индикаторов с помощью специальной методики микроструктурного анализа [12].

Объект исследований

Работы проводились на молибден-урановом месторождении Антей, локализованном в позднепалеозойском гранитоидном фундаменте Стрельцовской кальдеры, сформированной в процессе позднемезозойской тектономагматической активизации региона. Жильно-штокверковое оруденение месторождения размещено по разрезу ниже Стрельцовского месторождения, расположенного в вулканогенно-осадочном чехле кальдеры (рис. 1) [4].

Вмещающие породы месторождения представлены в основном биотитовыми и лейкократовыми гранитами, а также высоко- и низкотемпературными метасоматитами в рудоносных зонах, контролируемых системой копланарных разломов. На месторождении Антей выделяются несколько основных типов метасоматических преобразований [1]: высокотемпературная калишпатизация, низкотемпературная гидрослюдизация, рудосопровождающая гематит-альбитизация, рудосопровождающее окварцевание, пострудные метасоматиты (рис. 2).

Отработка молибден-урановых руд ведется подземным способом. Исследования проводились на следующих горизонтах месторождения — 9, 10, 11, 12, 13 и 14, расположенных на глубинах ~568, 636, 690, 750, 810 и 870 м от поверхности соответственно. На каждом горизонте были отобраны коллекции ориентированных в пространстве образцов, представляющих все разновидности вмещающих пород: гранитоидов и их метасоматических преобразований (калишпатит-альбитизация, гидрослюдизация). В пределах изученных горизонтов помимо тектонического каркаса были закартированы и вынесены на погоризонтные планы данные по разновидностям вмещающих гранитоидов, характеру и интенсивности их динамометаморфических и метасоматических преобразований (рис. 3).

Структурно-петрофизические исследования

Проведенные петрофизические исследования включали в себя изучение скоростей продольных (V_p) и сдвиговых (V_s) волн в сухом и водонасыщенном состоянии пород. Изученные ориентированные образцы (более 80) представляли собой кубы с гранью не менее 50 мм. Для проведения измерений использовался комплекс аппаратуры, состоящий из генератора-приемника ультразвуковых сигналов «Panametrics PR5072» (США) и пары излучателей P- и S-волн «Panametrics» с собственной частотой колебаний 1 МГц. Получае-

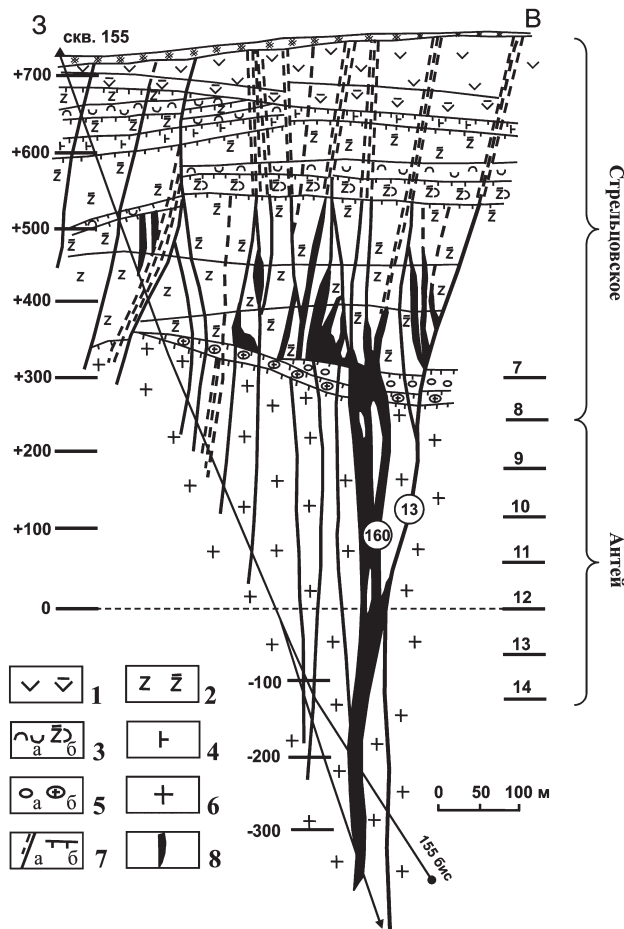


Рис. 1. Разрез по месторождениям Антей и Стрельцовское (по [4] с дополнениями [9]): 1 — фельзиты; 2 — трахидациты; 3 — туфы (а) и туфолавы (б) трахидацитов; 4 — базальты; 5 — конгломераты (а) и структурный элювий гранитов (б); 6 — гранитоиды; 7 — крутопадающие разломы (а) и пологие срывы (б); 8 — рудные зоны и отдельные тела. Слева указана шкала высот над уровнем моря, справа — положение в разрезе и номера горизонтов горных выработок

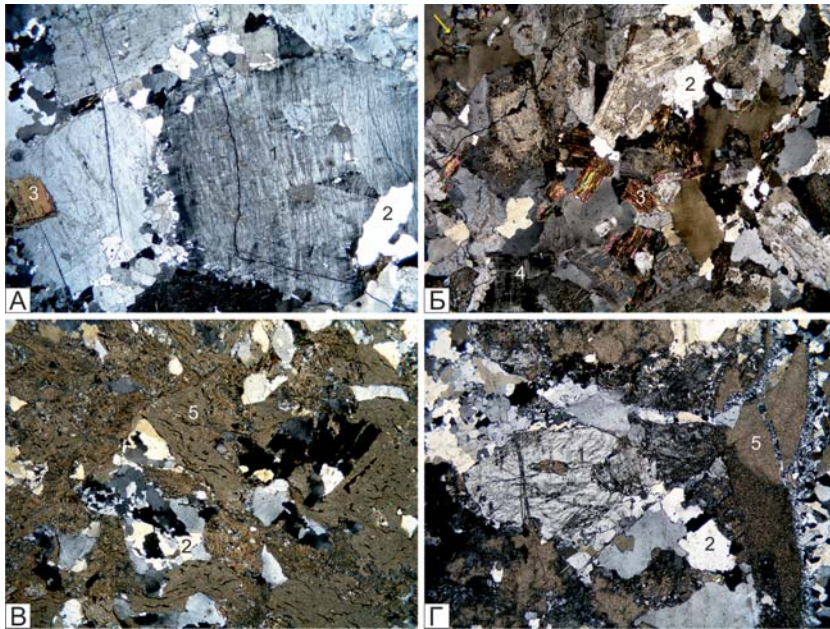


Рис. 2. Вмещающие породы месторождения Антей: А — неизменный биотитовый гранит; Б — высокотемпературный кварц-калишпатовый метасоматит (калишпатит); В — катаклазированный и брекчированный гидрослюдистый метасоматит; Г — интенсивно брекчированный гидрослюдист с зонами окварцевания (1 — полевой шпат; 2 — кварц; 3 — биотит; 4 — микроклин; 5 — гидрослюда; 6 — плагиоклаз [6])

мые волновые картины оцифровывались с помощью осциллоскопа «ТiePie508» (Нидерланды). В качестве контактной смазки применялся гель полисахаридов. Скорости волн измерялись в сухом состоянии после просушивания при температуре 70 °С в течение 4 часов и в водонасыщенном — после постепенного погружения в воду в течение 7 суток. Практика показывает,

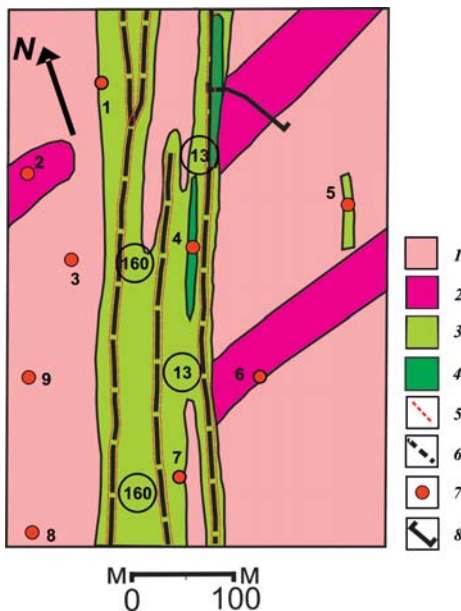


Рис. 3. План горизонта 9 месторождения Антей: 1 — биотитовые и лейкократовые разновидности гранитоидов; 2 — высокотемпературные калишпатиты; слабо (3) и интенсивно (4) проявленные гидрослюдисты; 5 — контур оруденения; 6 — разломы; 7 — точки отбора образцов; 8 — профили отбора образцов. N — направление «на север»

что такой способ приводит к полному насыщению образцов низкопористых пород в отличие от «принудительного» водонасыщения в вакууме. Погрешность определения V_p и V_s после калибровки на эталонных образцах кварца и стали не превышала 1 % [3, 5, 6]. По результатам измерения скоростей продольных (V_p) волн для образцов был вычислен эффект водонасыщения для продольных волн $E(V_p)$ по следующей формуле [15]:

$$E(V_p)(\%) = \frac{V_{P_{нас}} - V_{P_{сух}}}{V_{P_{сух}}} \cdot 100\%,$$

где $V_{P_{сух}}$ — скорости продольных волн в сухом состоянии, $V_{P_{нас}}$ — скорости продольных волн в водонасыщенном состоянии.

Эффект водонасыщения показывает разницу в скоростях ультразвуковых волн в сухом и водонасыщенном состоянии породы. Этот параметр практически не используется в геологической практике, хотя он характеризует количество микротрещин и поровых каналов, благоприятных для циркуляции рудоносных раство-

ров. Для наглядности результаты вычислений приведены в виде графика (рис. 4).

Анализ графика показывает, что значения эффекта водонасыщения в разрезе с 9 по 13 горизонты находятся в относительно близком диапазоне (~2,8–5,8 %). Однако начиная с 11 горизонта, отчетливо видна тенденция к повышению значений эффекта водонасыщения. Особенно ярко эта тенденция проявляется на отрезке с 13 по 14 горизонт, где значения эффекта водонасыщения резко возрастают от 5,8 до 17,9 %.

Наряду с этим установлена выраженная директивность скоростей ультразвуковых волн (рис. 5) для образцов, отобранных из жилообразных тел калишпатитов и альбититов [7].

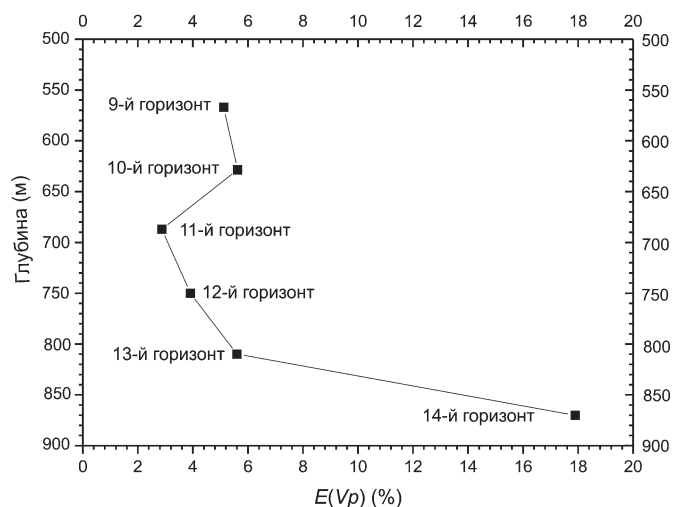


Рис. 4. Изменение значений эффекта водонасыщения $E(V_p)$ в образцах гранитов на горизонтах 9–14 месторождения Антей

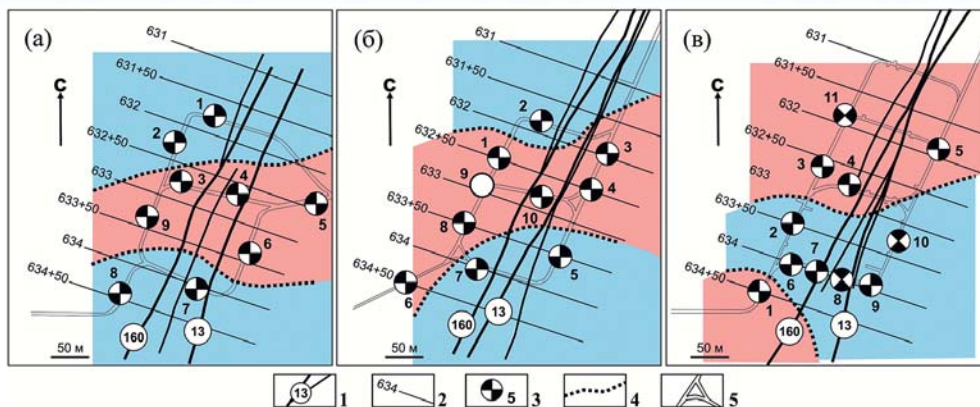


Рис. 5. Характер анизотропии упругих свойств пород на горизонтах 9 (а), 10 (б) и 11 (в): 1 — основные разломы и их номера; 2 — разведочные линии и их номера; 3 — направление увеличения (черные сектора) скоростей продольных и сдвиговых волн в плоскости OXY при водонасыщении ориентированных образцов (указаны номера), отсутствие секторов указывает на изотропию упругих свойств; 4 — границы зон разнонаправленного увеличения скоростей продольных и сдвиговых волн; 5 — контуры горных выработок [7]

Это обстоятельство, наряду с результатами тектонофизических реконструкций [9], позволяет объяснить нахождение обогащенных рудных столбов в местах пересечения субширотных тел альбитизированных и калишпатизированных гранитов (подчеркивающими, возможно, элементы прототектоники) с рудоподводящими разломами 13 и 160. В период рудообразования системы микротрещин, выявленные ультразвуковыми исследованиями, могли составлять сети взаимосвязанных трещинно-поровых каналов, которые служили путями для направленных и фокусированных потоков ураноносных растворов.

В целях установления связей между изменением значений эффекта водонасыщения и вероятными преимущественными направлениями течений рудоносных растворов была проанализирована зависимость эффекта водонасыщения от глубины локализации тел калишпатизированных гранитов и остальных вмещающих пород. Выбор такой зависимости также объясняется нахождением обогащенных рудных столбов на пересечении тел калишпатитов и зон рудоподводящих разломов.

В случае калишпатизированных гранитов видно, что эффект водонасыщения для оси X ориентированных образцов (латеральное направление «на север» совпадает с простиранием рудоконтролирующих разломов 13 и 160) обладает минимальными значениями (от 1,8 до 4,9 %) по отношению к остальным направлениям вне зависимости от глубины размещения. В противоположность этому, максимальные значения эффекта водонасыщения (от 5,2 до 8,3 %) относятся к оси Y , которая отвечает направлению «запад-восток», что приблизительно совпадает с направлением простирания тел калишпатитов и ортогонально простиранию рудоконтролирующих разрывных структур.

Для остальных типов гранитоидов месторождения Антей максимальные значения эффекта водонасыщения принадлежат оси X (от 5,2 до 6,8 %), а минимальные (от 2,6 до 4,6 %) характерны для направления «запад-восток» (ось Y). Лишь на 11 горизонте мини-

мальные значения эффекта водонасыщения приурочены к оси Z (0,5 %), что может быть связано с переориентировкой оси сжимающих усилий на гипсометрическом уровне данного горизонта [5].

Все это может говорить о совпадении простирания основных рудоконтролирующих разрывных структур (разломы 13 и 160), которые сопровождаются гидростлюдизитами, и систем микротрещин, характеризуемых вариациями значений эффекта водонасыщения. В свою очередь, именно эти системы микротрещин и

поракапилляров могли формировать объемную инфраструктуру путей движения рудоносных растворов. Выявленную закономерность следовало верифицировать независимыми методами, которые позволили бы определить структуру микротрещинного пространства и его эффективные фильтрационные параметры на период рудообразования. Авторами было принято решение изучить массив рудовмещающих пород с помощью микроструктурного анализа.

Микроструктурные исследования

Микроструктурный анализ осуществлялся на основе специальной методики, которая пока не получила широкого распространения в российской геологической науке и практике [11]. Методика включает в себя картирование и детальное изучение микроструктур в ориентированных шлифах, выявление закономерностей распределения линейных объектов (разрывов, контактов минеральных зерен, включений, шлиров) на площади шлифа с помощью оптического микроскопа, оборудованного цифровой камерой. Образцами для микроструктурного анализа служили те же самые ориентированные в пространстве образцы, которые использовались при петрофизических исследованиях. Из них изготавливались ориентированные шлифы. Для реализации и частичной автоматизации методики было разработано модульное программное обеспечение (ПО) с широким выбором инструментов для анализа цифровых изображений шлифов [12]. Разработанное ПО позволяет маркировать все микрообъекты в шлифах в ручном или полуавтоматическом режиме, выявлять генерации и системы микроструктур, определять пространственные (азимуты простирания) и рассчитывать фильтрационные (общую и директивную пористость и проницаемость) параметры микропространства.

Благодаря применению комплекса методов становится возможно реконструировать пути и условия миграции гидротермальных, в том числе рудоносных, растворов, устанавливать хронологию флюидопроницаемости пород, восстанавливать этапы эволюции трещинно-

порового пространства и количественно рассчитывать фильтрационные характеристики различных типов горных пород в палео- и современных условиях, и, что важно, определять динамику изменения термобарических и физико-химических условий рудообразования на различных этапах тектогенеза [8, 10, 11].

Для достижения поставленной цели — оценка путей и флюидодинамических условий миграции рудоносных растворов — при использовании средств специальной методики микроструктурного анализа сделан акцент на вычислении фильтрационных характеристик пород, которые определяются наличием открытых и/или частично минерализованных микротрещин. Требовалось сопоставить эти характеристики с результатами петрофизических исследований, а также со значениями эффективной пористости и проницаемости пород, измеренных в лабораторных условиях.

Значения пористости и проницаемости горных пород в палео- и современных условиях могут быть получены количественным методом с помощью реконструкции геометрии сети микротрещин, аппроксимированных как диски [14]. Понятие «геометрия сети микротрещин» включает в себя ориентировку, среднюю длину и аперттуру (величина раскрытия) микротрещин. Сегмент микротрещины, наблюдаемой в пересечении с поверхностью шлифа, естественно короче, чем диаметр диска. Однако для упрощения предполагается, что максимальная длина трещины соответствует диаметру диска. Если представить, что все открытые микротрещины, образовавшиеся на определенном этапе деформаций, взаимосвязаны, то можно использовать эквивалентную трещину с совокупной длиной, равной диаметру диска. На основании этого, пористость может быть определена количественно:

$$\Phi = \frac{(L \cdot \pi \cdot e)}{S},$$

где Φ — открытая или директивная пористость, L — совокупная длина определенной системы трещин, S — площадь изучаемой поверхности, e — аперттура системы трещин.

С помощью приведенной формулы на основе результатов микроструктурного анализа становится возможным определять не только суммарную открытую пористость (для всех открытых систем микротрещин) для конкретного образца, но и пористость директивную — для определенного направления или генерации микротрещин.

Определение трещинной проницаемости также основано на предположении, что все трещины связаны и могут быть аппроксимированы дисками с

аперттурой, эквивалентной толщине трещин. Для простоты считалось, что трещины падают перпендикулярно плоскости изучаемой поверхности и формируют анизотропную систему. Учитывая формулу для объемной плотности, которая может быть определена если известна поверхностная плотность и половина длины всех трещин [13], можно получить формулу для определения значений микротрещинной проницаемости (K_f):

$$K_f = \frac{(\varepsilon \cdot c \cdot e^3)}{6S},$$

где K_f — проницаемость общая или директивная (для определенной системы трещин), выраженная в m^2 , ε — коэффициент шероховатости стенок трещин, c — половина длины трещины, e — аперттура, S — площадь изучаемой поверхности.

Примененная техника является простым и быстрым способом оценки трещинной пористости и проницаемости, которые проявляются в определенное время деформационной истории массивов горных пород. Ранее авторами уже проводились исследования по расчету вариаций фильтрационных характеристик пород месторождения Антей на 9 и 11 горизонтах в зоне разлома 13 [10]. Результаты, полученные для пористости и проницаемости пород, сопоставлялись с результатами лабораторных исследований этих же образцов, проведенных на геологическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова А.А. Бурмистровым и В.А. Минаевым (рис. 6).

Значения, полученные расчетным путем с использованием микроструктурного подхода, и результаты лабораторных измерений показали хорошую сопоставимость, что дало основание использовать метод расчета фильтрационных характеристик в дальнейших иссле-

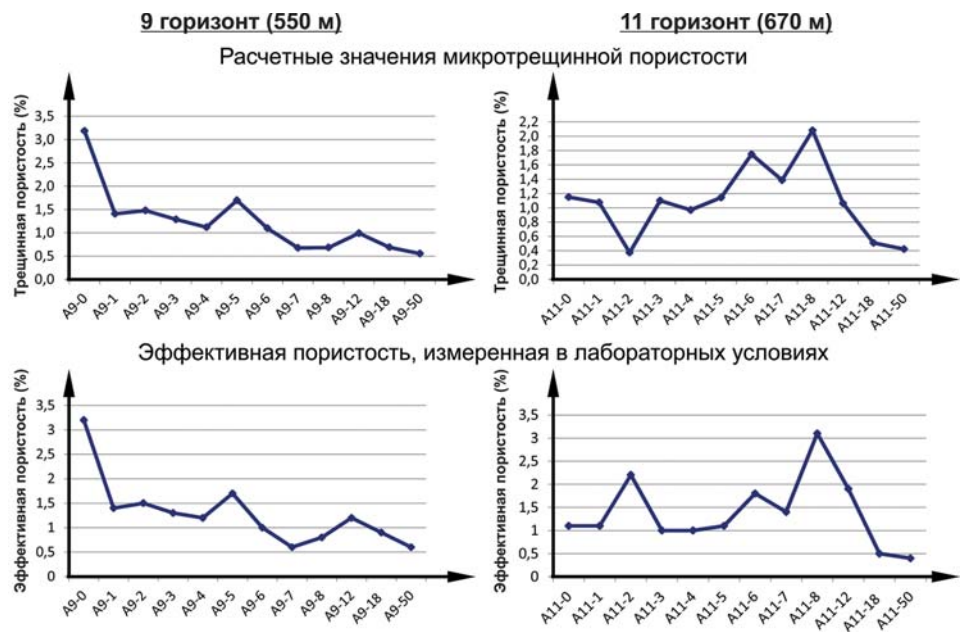


Рис. 6. Сравнение значений микротрещинной пористости (расчет) и эффективной пористости (метод гидростатического взвешивания) для образцов 9-го и 11-го горизонтов (указаны глубины залегания от дневной поверхности) месторождения Антей, отобранных по мере удаления от ядра разлома 13 (образец с индексом 0)

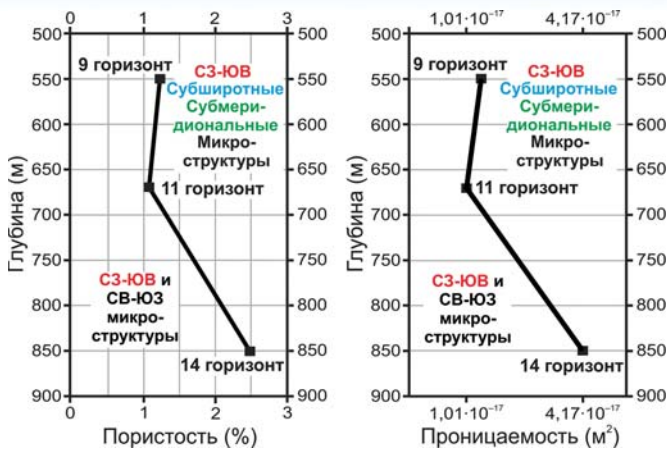


Рис. 7. Фильтрационные характеристики (пористость и проницаемость) пород месторождения Антей по горизонтам, вычисленные на основе специальной методики микроструктурного анализа

дованиях пород 9, 11 и 14 горизонтов месторождения. Изучение ориентированных прозрачных шлифов на сканирующем электронном микроскопе позволило выявить основные генерации открытых и/или частично выполненных рудной минерализацией проницаемых микротрещин в породах этих горизонтов.

На 9-м и 11-м горизонтах открытыми являются три генерации микротрещин: ССЗ субмеридионального, ВСВ субширотного, СЗ-ЮВ простираения. Анализ роздиаграмм показал, что генерация микротрещин, имеющая ВСВ субширотное простираение, наиболее проявлена. Микротрещины ССЗ субмеридионального простираения чуть менее проявлены, а меньше всех распространены микротрещины СЗ-ЮВ ориентировки. На фотографиях, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа, отчетливо видно, что микротрещины СЗ-ЮВ простираения имеют чуть большую степень раскрытия (около 10–11 мкм), нежели микротрещины, относящиеся к двум другим системам. Соответственно, данная система оказывает наибольшее влияние на формирование фильтрационных свойств пород.

На 14-м горизонте картина иная — здесь открытые микротрещины относятся преимущественно к генерациям СЗ-ЮВ и СВ-ЮЗ простираения. Среди этих двух систем наиболее проявлена система микротрещин СВ-ЮЗ простираения, она же имеет наибольшую степень раскрытия. При этом изучение внутрирудных тектонических подвижек с помощью осколковой радиографии ориентированных шлифов показало, что система трещин СЗ-ЮВ простираения образовалась в первую очередь, а затем на нее наложилась система СВ-ЮЗ трещин, смещая первые с видимыми амплитудами [10].

Значения пористости и проницаемости рассчитывались как для совокупности выявленных систем проницаемых микротрещин (общая пористость и проницаемость), так и для каждой генерации микротрещин в отдельности (директивные пористость и проницаемость).

На основе полученных значений пористости и проницаемости были построены графики изменения сред-

них значений этих величин по горизонтам (рис. 7), которые имеют схожий вид с графиком изменения значений эффекта водонасыщения в образцах гранитов на горизонтах 9–14 месторождения Антей, полученного посредством петрофизических исследований (рис. 4).

На 9-м горизонте расчетное значение пористости соответствует 1,24 %, а затем достигает минимального значения на 11-м горизонте, где оно составляет 1,05 %. На 14-м горизонте значение пористости максимально (2,48 %). Значения проницаемости показывают такую же закономерность: на 9-м горизонте наблюдается среднее значение проницаемости (1,2·10⁻¹⁷ м²), которое несколько уменьшается к 11-му горизонту (1,01·10⁻¹⁷ м²), а затем происходит резкое повышение фильтрационной способности пород на 14-м горизонте (4,17·10⁻¹⁷ м²). Все это может свидетельствовать о том, что на уровне 14-го горизонта резко возрастает количество поровых каналов и микротрещин.

Полученные расчетные результаты микроструктурного анализа подтверждают выводы петрофизических исследований о том, что на месторождении Антей с глубиной происходит увеличение фильтрационной способности пород, что может быть обусловлено неоднородностью общей тектонической обстановки на разных глубинных уровнях рудовмещающего массива пород.

Выводы

Обобщение полученных результатов изучения путей и флюидодинамических условий миграции рудоносных растворов на месторождении Антей с помощью петрофизического и микроструктурного анализов приводит к следующим выводам.

1. Совокупность применения методов структурной петрофизики и микроструктурного анализа позволяет устанавливать благоприятные для фильтрации рудоносных растворов ослабленные участки массивов пород и получать статистически достоверную количественную информацию. Помимо петрофизической оценки деформационных, метаморфических и гидротермально-метасоматических преобразований пород и руд, выделения петрофизических типов сред структурообразования и барьеров рудоотложения, появляется возможность изучения роли микроструктур в формировании объемной фильтрационной способности пород и выявления конкретных структурно-динамических факторов рудоотложения, влияющих, в свою очередь, на изменение того или иного петрофизического параметра. Наряду с этим результаты структурно-петрофизического и микроструктурного анализов хорошо воспроизводимы и взаимоконтролируемы, что повышает достоверность получаемой информации.

2. Микроструктурный анализ позволил выявить различия в ориентировке и количестве генераций открытых проницаемых микроструктур в верхних (9, 11 горизонты) и нижних (14 горизонт) частях месторождения Антей. Расчеты фильтрационных характеристик показали резкое увеличение средних значений пористости и проницаемости по мере увеличения глубины. Комплекс петрофизических и микроструктурных исследований указывает на то, что с глубиной,

начиная с 11 горизонта месторождения, в горном массиве увеличивается количество микротрещин и поровых каналов, способных формировать повышенную объемную проницаемость матрицы пород для фильтрации гидротермальных растворов и миграции ураново-родного вещества.

Благодарности

Авторы выражают благодарность руководству и сотрудникам ПАО «ППГХО» за содействие и помощь в проведении исследований на месторождении Антей и объектах Стрельцовского рудного поля. Особенно хочется поблагодарить главного геолога С.И. Щукина и заместителя главного геолога В.А. Толстоброва за неоценимую помощь в организации полевых работ, предоставленный доступ на объекты рудного поля и возможность работы с фондовым и актуальным картографическим материалом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы 1.4П фундаментальных исследований Президиума РАН и гранта РФФИ 15-05-01369.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева, О.В. Метасоматические процессы на урановых месторождениях Тулукуевской кальдеры в Восточном Забайкалье (Россия) / О.В. Андреева, В.А. Головин // Геология рудных месторождений. — 1998. — Т. 40. — № 3. — С. 205–220.
2. Бетехтин, А.Г. Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях / А.Г. Бетехтин, Ф.И. Вольфсон, А.Н. Заварицкий, Д.С. Коржинский, О.Д. Левицкий, В.А. Николаев — М.: Изд-во АН СССР, 1953. — 615 с.
3. Бурмистров, А.А. Структурно-петрофизический анализ месторождений полезных ископаемых / А.А. Бурмистров, В.И. Старостин, А.Л. Дергачев, В.А. Петров — М.: Изд-во МАКС Пресс, 2009. — 408 с.
4. Ищукова, Л.П. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье / Л.П. Ищукова — Иркутск: Типография «Глазовская», 2007. — 260 с.
5. Минаев, В.А. Структурно-петрофизические условия локализации урановых руд в фундаменте Стрельцовской кальдеры (на примере месторождения Антей): Дис... канд. геол.-минер. наук. — М.: ИГЕМ РАН, 2016. — 135 с.
6. Минаев, В.А. Напряженно-деформированное состояние и вариации значений упругих параметров вмещающих гранитоидов молиб-

ден-уранового месторождения Антей (Восточное Забайкалье) на разных глубинах / В.А. Минаев, В.А. Петров, В.В. Полуэктов // Геофизические исследования. — 2016. — Т. 17. — № 2. — С. 19–31.

7. Петров, В.А. Изучение природных и техногенных процессов на урановом месторождении в гранитах для обоснования безопасности длительной изоляции ОЯТ / В.А. Петров, В.В. Полуэктов, Р.М. Насимов, А.А. Бурмистров, С.И. Щукин / Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 2. — М.: ИФЗ РАН, 2011. — С. 125–138.

8. Петров, В.А. Реконструкция путей и условий миграции рудоносных гидротермальных растворов: структурно-геологический и термобарогеохимический подход / В.А. Петров, С.А. Устинов, В.В. Полуэктов, В.Ю. Прокофьев // Вестник РФФИ. — 2013. — № 1. — С. 27–33.

9. Петров, В.А. Тектонофизика гидротермального рудообразования: пример молибден-уранового месторождения Антей, Забайкалье / В.А. Петров, Ю.Л. Ребецкий, В.В. Полуэктов, А.А. Бурмистров // Геология рудных месторождений. — 2015. — Т. 57. — № 4. — С. 327–350.

10. Устинов, С.А. Влияние неоднородности поля напряжений-деформаций на миграцию флюидов в разломных зонах (на примере месторождения Антей, Юго-Восточное Забайкалье): Дис... канд. геол.-минер. наук. — М.: ИГЕМ РАН, 2016. — 183 с.

11. Устинов, С.А. Использование планарных систем флюидных включений в структурно-геологических исследованиях гидротермальных месторождений (на примере месторождения Антей) / С.А. Устинов, В.А. Петров, В.В. Полуэктов // Изв. вузов. Геология и разведка. — 2014. — № 1. — С. 36–41.

12. Устинов, С.А. Применение ГИС-технологий для микроструктурного анализа в геологии / С.А. Устинов, В.А. Петров // Геоинформатика. — 2015. — № 2. — С. 33–46.

13. Dehoff, R. Microscopic Quantitative. Masson et Cie R. / R. Dehoff, F.N. Rhines, 1972. — 401 p.

14. Lespinasse, M. Microfissural mapping of natural cracks in rocks: Implications for fluid transfers quantification in the crust / M. Lespinasse, L. Désindes, P. Fratzczak, V. Petrov // J. Chemical Geology. — 2005. — N 223. — P. 170–178.

15. Zamora, M. Anisotropy of elastic and anelastic properties of granites from the Hirabayashui hole, Japan / M. Zamora, A.P. Pezard, H. Ito // Proc. Internat. workshop on the Nojima fault core and borehole data analysis. Tsukuba, Japan, 1999. — P. 227–231.

© Коллектив авторов, 2017

Петров Владислав Александрович // vlad243@igem.ru
Минаев Василий Александрович // minaev2403@mail.ru
Устинов Степан Андреевич // stevesa@mail.ru
Полуэктов Валерий Викторович // vapol@igem.ru
Андреева Ольга Владимировна // akimolan@igem.ru

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.34:556.3

Ершов В.В. (ФГБУ «Гидроспецгеология»)

МЕРЗЛОТНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПЕЧОРСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАСЕЙНА

Рассмотрены зоны распространения многолетнемерзлых пород на территории Печорского артезианского бассейна. Выявлены закономерности распространения многолетнемерзлых пород в этих зонах. Зоны распространения многолетнемерзлых пород рассматриваются отдельно по бассейнам третьего порядка. Показаны мощности многолетнемерзлых пород, условия их залегания и приуро-

ченности. Для каждой зоны приведены характерные температуры многолетнемерзлых пород. Даны условия и причины распространения различных геокриологических процессов. **Ключевые слова:** Печорский артезианский бассейн, многолетнемерзлые породы, криолитозона, криогенные процессы.

Ershov V.V. (Gidrospetsgeologiya)

THE PERMAFROST ZONING OF THE HYDROGEOLOGICAL STRUCTURES OF THE PECHORA ARTESIAN BASIN

Areas of distribution of permafrost in the territory of the Pechora artesian basin are considered. The regularities of the distribution of permafrost in these zones are revealed. The zones of permafrost are considered separately for third-order