

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ВАРИАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ УПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ ВМЕЩАЮЩИХ ГРАНИТОИДОВ МОЛИБДЕН- УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ АНТЕЙ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ) НА РАЗНЫХ ГЛУБИНАХ

© 2016 г. В.А. Минаев, В.А. Петров, В.В. Полуэктов

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

Рассмотрены результаты петрофизических исследований образцов вмещающих гранитоидов с глубоких горизонтов молибден-уранового месторождения Антей, приуроченного к Стрельцовскому рудному полю (Юго-восточное Забайкалье). Установлено, что с глубиной в образцах наблюдается понижение скоростей ультразвуковых волн, уменьшаются значения коэффициента Пуассона и упругих модулей, что говорит о резком снижении способности пород к сопротивлению механическому воздействию, повышении хрупкости, трещиноватости и пористости пород. Кроме того, с глубиной увеличивается степень нарушенности кристаллической матрицы. Повышенные значения фильтрационных параметров указывают на условия, благоприятные для циркуляции рудоносных растворов и рудолокализации. В соответствии с этим можно ожидать увеличение количества и мощности рудных тел с глубиной. Однако реальная ситуация на месторождении кардинально иная – с глубиной и количество, и мощность рудных тел уменьшается. Предварительные расчеты значений современных главных нормальных напряжений показывают, что на глубоких (>750 м) горизонтах месторождения тектонический режим растяжения сменяется режимом сжатия.

Делается вывод о необходимости проведения инструментальных исследований напряженно-деформированного состояния горного массива месторождения Антей и целесообразности разработки проекта подземного бурения наклонных скважин для обнаружения скрытых рудных тел.

Ключевые слова: гранитоиды, главные нормальные напряжения, месторождение урана, петрофизические параметры, тектонический режим, ультразвук.

Введение

Месторождение Антей находится в Забайкальском крае вблизи г. Краснокаменска, расположенного в 460 км к юго-востоку от г. Чита. Добыча молибден-урановых руд ведется подземным способом. Стрельцовское рудное поле, к которому приурочено месторождение, размещено в одноименной кальдере, сформировавшейся в позднем мезозое. Штокверково-жильные крутопадающие рудные тела месторождения локализованы в позднепалеозойском кристаллическом фундаменте кальдеры и контролируются ветвями разломов субмеридионального простирания, образующих Центральную зону разломов. Разлом, контролирующий оруденение на месторождении Антей, прослеживается из фундамента в чехол вулканогенных позднемезозойских пород. Швы, развитые в висячем боку разлома, представляют собой основные рудовмещающие разрывы, ограниченные по восстанию подошвой чехла [Лаверов и др., 2008; Петров и др., 2009].

Для нахождения новых рудных тел и обеспечения безопасности ведения горных работ на месторождении необходимы знания о петрофизических свойствах пород.

В данной статье основное внимание уделяется упругим свойствам пород, которые включают в себя скорости ультразвуковых продольных (V_P , км/с) и поперечных (V_S , км/с) волн, динамические модули упругости (K – модуль объемного сжатия, ГПа; G – модуль сдвига, ГПа; E – модуль Юнга, ГПа) и коэффициент Пуассона μ .

В настоящее время особый интерес представляет изучение и определение закономерностей прохождения ультразвуковых волн через анизотропные среды, какими являются горные породы. Ультразвуковые методы основываются на тесной связи скорости распространения волн и их затухания с физическими свойствами и структурой вещества. Интенсивное развитие ультразвуковых методов обусловлено возможностью их использования для решения широкого круга задач при высокой точности измерений и относительной простоте применяемой аппаратуры [Ямицков, 1982].

При изучении минералов и горных пород большое внимание уделяется физической анизотропии. После того, как в начале XIX века в конструкцию микроскопа были введены поляризаторы, появились методы оптической поляризации, занявшие важнейшее место в петрографии. Микроструктурные особенности строения минералов позволили основоположнику структурной кристаллографии Е.С. Федорову (1853–1919) создать законченную классификацию 230 пространственных точечных групп симметрии, связанную с анизотропией оптических, диэлектрических, магнитных, упругих, термических и других свойств. Наиболее важным представляется изучение анизотропии упругих свойств, так как с ней связано поведение под нагрузкой разнообразных природных объектов и материалов.

Если теория анизотропии упругих свойств сред достаточно подробно разработана в многочисленных трудах (см., например, [Лехницкий, 1977; Петрашень, 1980] и др.), то в области экспериментальных методов изучения упругой анизотропии положение значительно хуже. Использование на практике оптических поляризационных методов ограничено, в частности, непрозрачностью горных пород. Именно это и обуславливает необходимость применения ультразвуковых методов.

Теоретический анализ

Анализ результатов ультразвуковых исследований дает возможность определить анизотропию упругих свойств горных пород, связанную с их структурно-текстурными особенностями. Отметим, что упругие параметры зависят не только от состава и структуры пород, но и от степени их деформирования, напряженного состояния горных массивов на разных глубинах и геодинамических обстановок формирования.

Существует большое количество инструментальных методов определения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород, среди которых согласно [Шкуратник, Николенко, 2012] следует выделять три класса:

геологические методы (анализ геологических и геотектонических особенностей массива; оценка напряженно-деформированного состояния на основе визуального осмотра горных выработок; оценка напряженно-деформированного состояния массива по дискованию керна);

геомеханические методы (метод разгрузки керна; метод частичной разгрузки; метод щелевой разгрузки; метод упругих включений; метод гидроразрыва; метод разности давлений; метод буровых скважин);

геофизические методы (ультразвуковой метод; гамма-метод; электрометрический метод; звукометрический метод; методы, основанные на использовании эффектов памяти в горных породах и композиционных материалах, помещаемых в массив).

Названные методы получили широкое распространение как у нас в стране (например, на Ловозерском редкометальном месторождении, Североуральских бокситовых месторождениях, Таштагольском железорудном месторождении и др.), так и за рубежом (подземные исследовательские лаборатории Аспё в Швеции, Гримзель в Швейцарии, ОНКАЛО в Финляндии, Уайт Шел в Канаде и др.).

На месторождении Антей, рассматриваемом в данной работе, в настоящее время начаты работы по инструментальной оценке напряженного состояния горного массива [Рассказов и др., 2012] и ведутся исследования по созданию расчетной модели его напряженно-деформированного состояния [Козырев, Семенова, Аветисян, 2014; Щукин и др., 2015; Петров и др., 2015].

Далее будут проанализированы данные о напряженно-деформированном состоянии массива пород месторождения Антей в сопоставлении с их структурно-петрофизическими особенностями.

Отметим, что до настоящего время не существует общепринятой терминологии для описания напряженно-деформированного состояния массивов пород. Международный союз горной механики (ISRM) предложил принять терминологию по [Hudson, Cornet, Christiansson, 2003], которая будет использоваться и нами применительно к напряженно-деформированному состоянию пород месторождения Антей (таблица).

Термины, используемые для описания напряженно-деформированного состояния массивов пород по [Hudson, Cornet, Christiansson, 2003]

Природные напряжения	Напряжения в массиве до его вскрытия горными выработками
Региональные напряжения	Напряженно-деформированное состояние среды в относительно большом геологическом пространстве
Напряжения дальнего поля	Напряженно-деформированное состояние среды за пределами влияния горных выработок
Тектонические напряжения	Напряженно-деформированное состояние среды, вызванное перемещением геологических масс
Гравитационные напряжения	Напряженно-деформированное состояние среды, вызванное колонной вышележащих пород
Локальные напряжения	Напряженно-деформированное состояние среды в небольшом геологическом пространстве
Напряжения ближнего поля	Напряженно-деформированное состояние среды в зоне влияния горных выработок
Наведенные напряжения	Природные напряжения, связанные с горнопроходческой деятельностью
Остаточные напряжения	Напряженно-деформированное состояние среды, связанное с предыдущей тектонической активностью
Термонапряжения	Напряженно-деформированное состояние среды, обусловленное температурным воздействием
Палеонапряжения	Природные напряжения предыдущих геологических эпох

Расчетная модель напряженно-деформированного состояния горного массива

При моделировании напряженно-деформированного состояния массивов горных пород особенности их внутреннего строения неизбежно схематизируются. В инженерно-геологической практике наиболее распространена модель, в которой изучаемая

среда рассматривается как однородная и изотропная. Такое допущение мало соответствует действительности, но позволяет использовать для решения поставленной задачи простые расчетные схемы и способы модельных построений. Реальные массивы горных пород, как правило, неоднородны и анизотропны по деформационным и прочностным свойствам, что обусловлено особенностями их минерального состава, строением каркаса разрывно-трещинных структур, степенью обводненности и другими факторами.

Определение параметров современного поля напряжений в разных точках Земного шара [Zoback, 1992; Fuchs, Müller, 2001] показало, что горизонтальные тектонические напряжения T составляют 10–40 МПа. При расчетах напряженно-деформированного состояния массива пород месторождения Антей принималось $T=15$ МПа, что в целом соответствует величинам главных нормальных напряжений, установленным инструментальными измерениями на удалении от Байкальской рифтовой зоны (www.world-stress-map.org). Инструментальными методами установлен также сдвиговый характер современного поля напряжений в региональном масштабе [Рассказов и др., 2014].

На основе данных о среднем механизме и ориентировке осей главных напряжений сжатия и растяжения в районе г. Краснокаменска по формулам, представленным в [Моделирование..., 2003], были выполнены расчеты значений главных нормальных напряжений для сдвигового стресс-режима, при котором

$$\sigma_H = \sigma_1 > \sigma_v = \sigma_2 > \sigma_h = \sigma_3,$$

где σ_v – вертикальные напряжения; σ_H, σ_h – главные и второстепенные горизонтальные напряжения; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные нормальные (максимальные, промежуточные и минимальные) напряжения; все напряжения измеряются в МПа.

При аналитическом решении задачи об общих закономерностях современного напряженно-деформированного состояния массива принимался ряд граничных условий. Считалось, что

- толща пород подвергается региональному субгоризонтальному сжатию и рассматривается как однородный (нетрещиноватый) изотропный, упруго деформируемый массив с горизонтальной поверхностью;

- тектонический режим носит сдвиговый характер – $\sigma_H = \sigma_1 > \sigma_v = \sigma_2 > \sigma_h = \sigma_3$;

- поле напряжений, обусловленное тектоническими силами, однородно для всего разреза, а горизонтальные напряжения, вызванные тектоническими силами, составляют 15 МПа;

- среднее значение плотности пород ρ составляет 2.7 г/см³, коэффициента Пуассона μ – 0.25;

- коэффициент бокового распора $\xi = \mu / (1 - \mu) = 0.33$;

- поровое флюидное давление $P_f = 0$;

- величины касательных напряжений τ_c в объеме деформируемых пород принимаются в виде $\tau_c = [(\sigma_1 - \sigma_3) / 2] \sin 2\varphi \sim 5.62 \pm 0.02$ МПа, где $(\sigma_1 - \sigma_3)$ – дифференциальное напряжение; $\varphi = 45^\circ$ – угол внутреннего трения (угол между осями эффективных нормальных и главных нормальных напряжений).

Действующие в массиве напряжения вычисляются по следующим формулам:

$$\sigma_v = \rho gh, \sigma_H = \xi \rho gh + T, \sigma_h = \xi \rho gh + \mu T,$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; h – расстояние от поверхности, м.

Результаты расчетов для принятых исходных данных и граничных условий в графическом виде представлены на рис. 1 и приведены в сопровождающей его таблице, в которой указаны также глубины (H , м) рассматриваемых горизонтов.

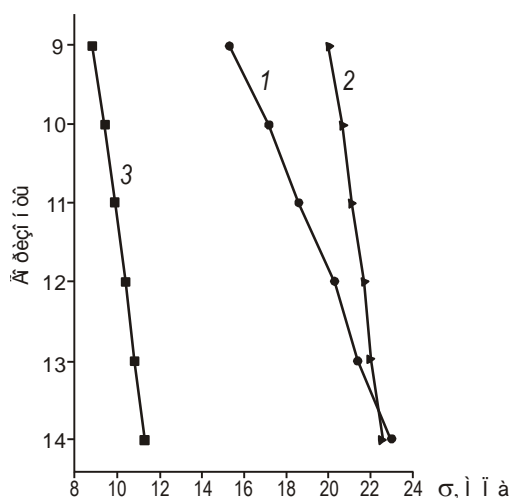


Рис. 1. Изменение значений нормальных напряжений в разрезе месторождения Антей для принятых граничных условий (горизонты 9–14).

1 – график изменения вертикальных напряжений σ_v ; 2 – главных горизонтальных σ_H ; 3 – второстепенных горизонтальных σ_h

Горизонт	H , м	σ_v , МПа	σ_H , МПа	σ_h , МПа
9	568	15.3	20.0	8.8
10	636	17.2	20.7	9.4
11	690	18.6	21.1	9.9
12	750	20.3	21.7	10.4
13	810	21.8	22.2	10.9
14	870	23	22.6	11.3

С учетом приведенных данных и при условии, что поровое флюидное давление P_f постоянно, а дифференциальный стресс ($\sigma_1 - \sigma_3$) составляет менее четырех значений предела прочности пород на растяжение (критерий разрушения Гриффита), можно в первом приближении проанализировать характер изменения современного тектонического поля напряжений в разрезе массива. Критерий Гриффита говорит о том, что разрушение произойдет тогда, когда при бесконечно малом удлинении трещины будет выделяться больше упругой энергии, чем это требуется для образования новых поверхностей. Согласно принципу Гриффита, существующая в теле трещина станет лавинообразно распространяться, если высвобождение энергии упругой деформации на единицу ее длины превзойдет работу на разрыв связей.

В нашей модели при сдвиговом стресс-режиме и $T=15$ МПа с наибольшей скоростью нарастают вертикальные напряжения σ_v , которые с глубиной становятся все более близкими к главным горизонтальным напряжениям σ_H . В результате этого на глубинах более 810 м (ниже горизонта 13) происходит переход от режима сдвига к режиму сброса – $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$. Иными словами, на этих глубинах сдвиговый режим горизонтального сжатия сменяется геодинамическим режимом растяжения, при котором вдоль плоскостей разломов будут происходить сбросовые перемещения.

Очевидно, что характер деформационного поведения пород и кинематические характеристики разрывов зависят от величины тангенциальных напряжений. В наших расчетах, проведенных по [Jaeger, Cook, 1979], касательные напряжения τ_c принимались равными $\sim 5.62 \pm 0.02$ МПа. Обычно предполагается, что уровень тангенциальных напряжений и, следовательно, вероятность развития сдвиговых перемещений в разрывно-трещинных системах с глубиной уменьшается, что обусловлено увеличивающейся литостатической нагрузкой. Однако теоретические закономерности часто не согласуются с реальной геологической ситуацией, когда с глубиной предрасположенность разрывов или отдельных их сегментов к сдвиговым дислокациям возрастает. Такие условия возникают, главным образом, из-за переориентировки (виргации) плоскостей сместителей и изменения угла их встречи с осью главных сжимающих усилий ($\sigma_1 = \sigma_H$ при сдвиговом тектоническом режиме). На глубоких (>750 м) горизонтах месторождения Антей в условиях правостороннего сдвига и при ориентировке оси главных горизонтальных напряжений S_H под углом от 50 до 80° к линии меридиана [Петров и др., 2009, 2015] наиболее предрасположены к сдвиговым дислокациям сегменты разломов и крупные трещины, которые ориентированы в направлениях В-СВ-З-ЮЗ и В-ЮВ-З-СЗ.

Результаты аналитического решения задачи об общих закономерностях современного напряженно-деформированного состояния геологической среды месторождения Антей сводятся к следующему.

1. В условиях регионального субгоризонтального сжатия в толще гранитов на глубинах более 810 м наблюдается смена сдвигового тектонического режима сбросовым. В результате этого возрастает вероятность сбросово-сдвиговых перемещений вдоль плоскостей основных разломов.

2. Увеличивающаяся с глубиной литостатическая нагрузка уменьшает уровень тангенциальных (сколовых) напряжений, но в условиях правостороннего сдвига и при ориентировке оси S_H под углом от 50 до 80° к линии меридиана предрасположенность разрывно-трещинных структур, ориентированных в направлениях В-СВ-З-ЮЗ и В-ЮВ-З-СЗ, к дислокациям сдвига возрастает.

Эти выводы требуют инструментального подтверждения. Однако вероятность изменения геодинамического режима с глубиной высока, что показывают измерения в подземных исследовательских лабораториях, расположенных в гранитных массивах [Ask, Stephansson, Cornet, 2001].

Ниже приводятся результаты петрофизических исследований вмещающих гранитоидов месторождения Антей, которые также свидетельствуют о смене деформационного режима от сдвигового (сжатие) к сбросовому (растяжение).

Типы вмещающих гранитоидов месторождения Антей

Под гранитоидами мы понимаем весь комплекс гранитов различного состава от лейкократовых до меланократовых разновидностей, которые различаются как по петрографическому составу и текстурно-структурным особенностям, так и по петрофизическим параметрам. На месторождении Антей вмещающими породами являются гранитоиды, подвергнувшиеся метасоматическим и деформационным преобразованиям различного типа и интенсивности (рис. 2).

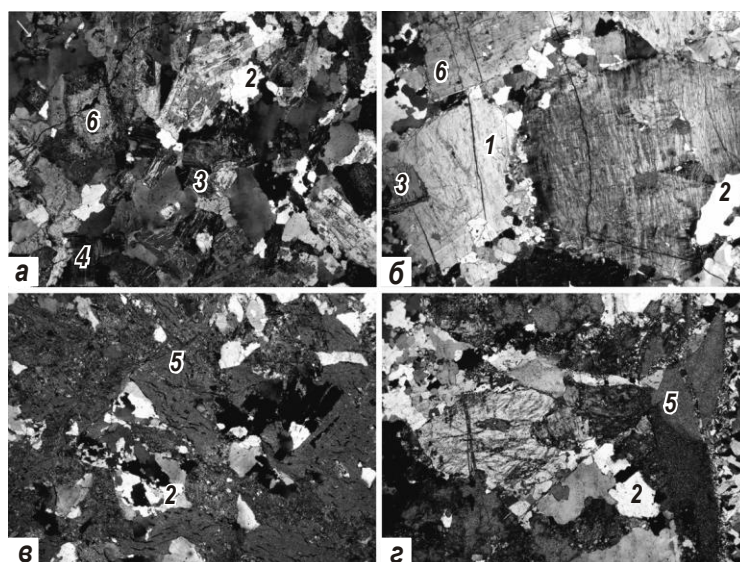


Рис. 2. Типы преобразованных гранитоидов месторождения Антей: неизменный биотитовый гранит (а), высокотемпературный кварц-калийшпатовый метасоматит (калийшпатит) (б); катаклазированный и брекчированный гидрослюдистый метасоматит (в); интенсивно брекчированный гидрослюдизит с зонами окварцевания (г). Фотографии шлифов, на которых цифрами обозначены полевой шпат (1), кварц (2), биотит (3), микроклин (4), гидрослюда (5), плагиоклаз (6)

Методика исследований

Исследования проводились на горизонтах 9–14 месторождения Антей, расположенных на глубинах ~568, 636, 690, 750, 810 и 870 м от поверхности (см. табл. на рис. 1). На каждом из горизонтов были отобраны коллекции ориентированных в пространстве образцов вмещающих гранитоидов. Для лабораторных измерений образцы были представлены в виде ориентированных кубов с гранью не менее 50 мм. Образцы размечались с нанесением на них координатных осей X, Y и Z в левой декартовой системе координат (рис. 3).

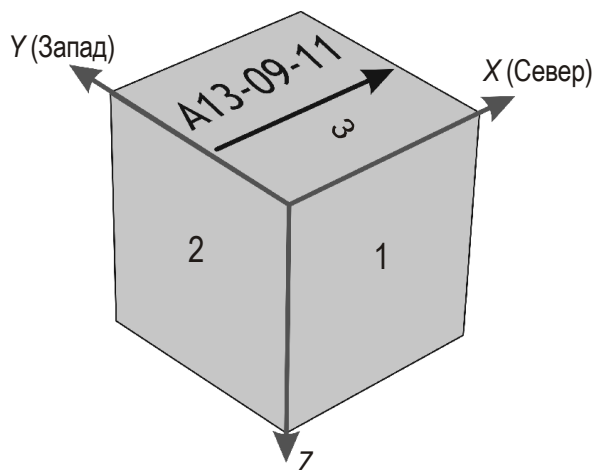


Рис. 3. Схематическое изображение образца, на котором проводились ультразвуковые измерения. Черная стрелка на верхней грани наносится при отборе образца и показывает направление на Север; цифры рядом со стрелкой – номер образца. 1, 2, 3 – плоскости прозвучивания

Для каждого направления (X, Y, Z) измерялись скорости упругих волн с помощью комплекса, состоящего из генератора-приемника ультразвуковых сигналов *Panametrics PR5072* (США) и пары излучателей P- и S-волн с собственной частотой 1 МГц. Все измерения проводились на образцах в двух состояниях – воздушно-сухом и водонасыщенном. Просушка образцов проводилась в сушильном шкафу при температуре 80 °С и продолжалась в течение трех часов. Водонасыщение образца достигалось путем его погружения в ванну на 6–7 суток при последовательном подливе воды. Заметим, что с учетом особенностей структуры трещинно-порового пространства гранитоидов такой метод водонасыщения является для них оптимальным [Петров, Насимов, 2014]. К тому же, открытая трещиноватость и пористость всех образцов не превышала 1 %.

Скорости упругих волн, измеренные в водонасыщенном состоянии, более соответствуют значениям их скоростей в массиве, чем скорости в сухих образцах, так как системы трещин, возникшие при коллекторской работе и последующей технологической обработке образцов, заполняются водой. Вследствие малой пористости влияние воды на значения скорости как продольных, так и поперечных волн незначительно.

С привлечением данных о плотности образцов по формулам, представленным в [Бурмистров и др., 2009], вычислялись модули объемной упругости K (модуль объемного сжатия), сдвига G , Юнга E и коэффициент Пуассона μ :

$$K = \rho(V_P^2 - 4/3V_S^2), G = \rho V_S^2,$$

$$E = \rho V_S^2(3V_P^2 - 4V_S^2)/2(V_P^2 - V_S^2) = [(G/2)(3V_P^2 - 4V_S^2)]/(V_P^2 - V_S^2),$$

$$\mu = (V_P^2 - 2V_S^2)/2(V_P^2 - V_S^2).$$

В этих формулах ρ – плотность образцов, г/см^3 ; V_P – скорость продольных волн, км/с ; V_S – скорость поперечных волн, км/с ; модуль Юнга E рассчитан при адиабатических условиях.

Зависимости от глубины средних значений V_P , V_S , K , G , E и μ в массиве пород представлены на рис. 4. Модули упругости рассчитаны для водонасыщенного образца, поскольку их значения, получаемые в этом случае, более близки значениям модулей в условиях массива. Представляемые значения вычислены как средние арифметические для каждого образца по трем направлениям, которые затем были усреднены для всех исследованных образцов.

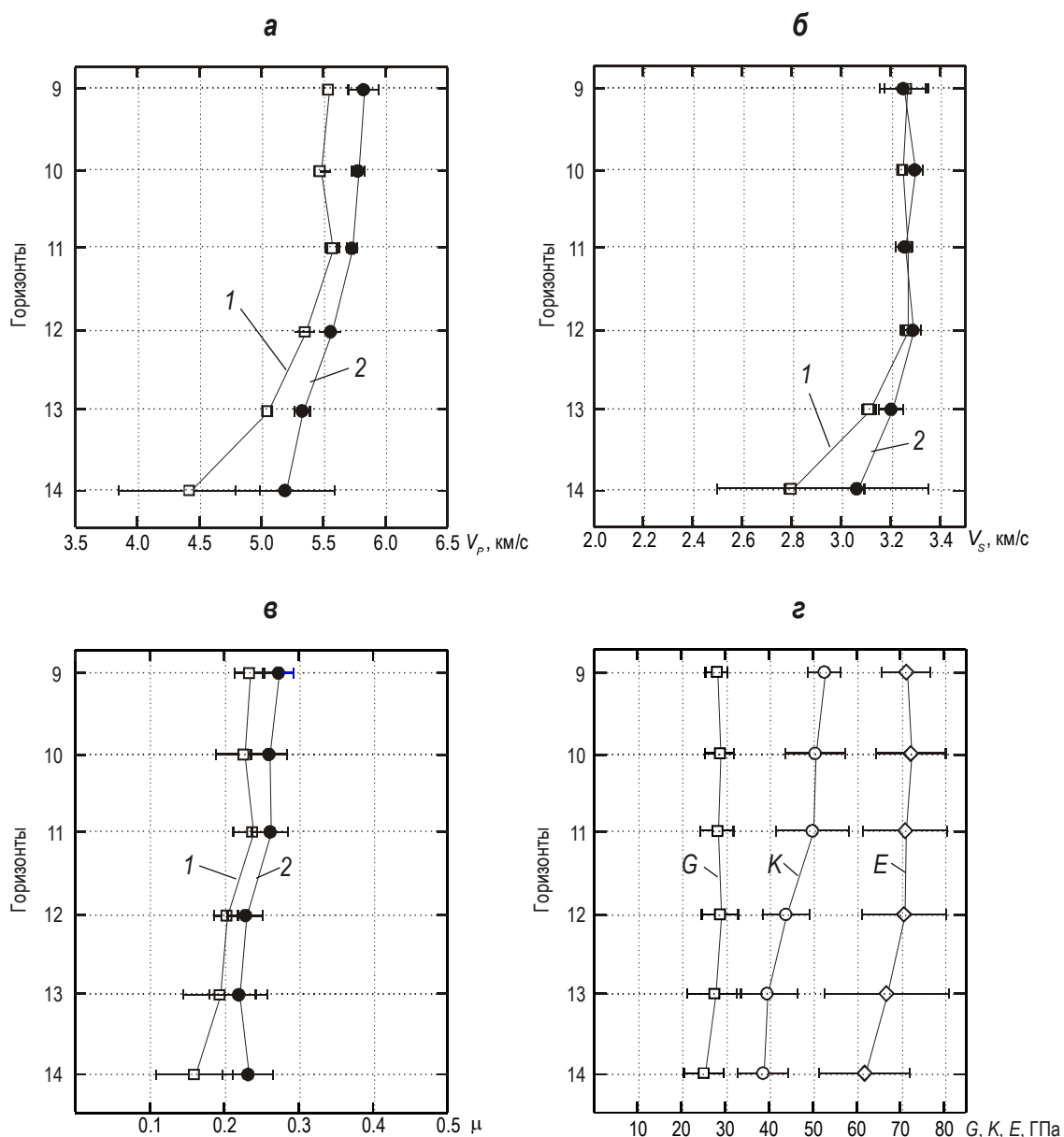


Рис. 4. Графики зависимости средних значений скоростей продольных V_P (а) и поперечных V_S (б) волн, коэффициента Пуассона μ (в) и модулей упругости G , K , E (г) от глубины в массиве пород. На а–в: 1 – сухое состояние образца, 2 – водонасыщенное. Горизонтальные отрезки на графиках – диапазон среднеквадратичных отклонений определяемых величин

Рассмотрим подробнее каждый из параметров. Значения скоростей продольных волн V_P (см. рис. 4, а) на горизонтах 9–11 сохраняются почти без изменения, составляя ~ 5.5 км/с в сухом состоянии и ~ 5.7 км/с в водонасыщенном. Разница между скоростями, замеренными в сухом и водонасыщенном состоянии, минимальна на горизонте 11, где она равна ~ 0.1 км/с (в остальных случаях – ~ 0.2 км/с), и максимальна на горизонте 14. На горизонтах 12, 13 скорости продольных волн в обоих случаях начинают резко снижаться, достигая на горизонте 14 значения 5.4 км/с в сухом состоянии и 5.2 км/с в водонасыщенном (рис. 4, а).

Похожая картина наблюдается и для скоростей поперечных волн (см. рис. 4, б). Резкое снижение скоростей начинается с горизонта 13 – если на горизонтах 9–12 значение V_S в среднем составляет 3.26 км/с в сухом состоянии и 3.27 км/с в водонасыщенном, то ниже горизонта 13 эти значения 3.11 км/с и 3.2 км/с соответственно. Минимальные расхождения скоростей V_S , определенных для образцов в сухом и водонасыщенном состояниях, отмечены на горизонте 11, максимальные – на горизонте 14.

Таким образом, на уровне горизонтов 12–14 наблюдается падение скоростей как продольных и поперечных волн. Это говорит о том, что на этих отметках массив вмещающих гранитоидов начинает терять свою целостность – повышается трещиноватость и увеличивается пористость пород.

Для коэффициента Пуассона μ (см. рис. 4, в) отмечается следующая закономерность. На горизонтах 9–11, как и в случае со скоростями продольных волн, значения μ остаются примерно в одном диапазоне и в сухом (~ 0.23) и в водонасыщенном (~ 0.26) состоянии, но начиная с горизонта 12, происходит их резкое понижение. В итоге, на горизонте 14 значения μ достигают 0.16 в сухом состоянии и 0.22 в насыщенном. Отмеченное означает, что ниже горизонта 12 хрупкость вмещающих гранитоидов месторождения повышается.

Рассмотрим динамические модули упругости (см. рис. 4, г). Если модуль сдвига G сохраняет приблизительно одинаковые (~ 28 ГПа) значения на всех горизонтах, то модуль объемного сжатия K и модуль Юнга E фактически повторяют поведение скоростей продольных волн (см. рис. 4, а) и коэффициента μ (см. рис. 4, в). Иными словами, на горизонтах 9–11 значения этих двух модулей остаются примерно одинаковыми – $K \approx 51$ ГПа, $E \approx 71.4$ ГПа, – но ниже горизонта 12 происходит заметное уменьшение их значений – к горизонту 14 значения K падают до 39 ГПа, значения E до 62 ГПа (см. рис. 4, г).

Последнее свидетельствует о резком уменьшении с глубиной способности пород к сопротивлению механическому воздействию. К тому же породы становятся более хрупкими, трещиноватыми и пористыми. Такая обстановка создает благоприятные условия для циркуляции рудоносных растворов.

В соответствии с этим количество и мощность рудных тел с глубиной должна увеличиваться. Однако мы можем судить только о современном состоянии вмещающих пород. Вопросы реконструкции условий палеотектонической и палеофильтрационной обстановки гидротермального рудообразования на месторождении Антей требуют специального рассмотрения, при котором полученные нами петрофизические могут составить информационную основу для построений.

Расчеты современных главных нормальных напряжений в разрезе массива показывают, что на глубоких (>750 м) горизонтах месторождения (горизонт 12 и ниже) может происходить смена режима правостороннего сдвига тектоническим режимом сброса [Минаев и др., 2013]. Пока эти расчеты не подкреплены экспериментально, но они

соответствуют основным тенденциям, наблюдаемым в исследовательских подземных лабораториях, размещенных в гранитных массивах, например, в подземной лаборатории Аспё (Швеция) (рис. 5).

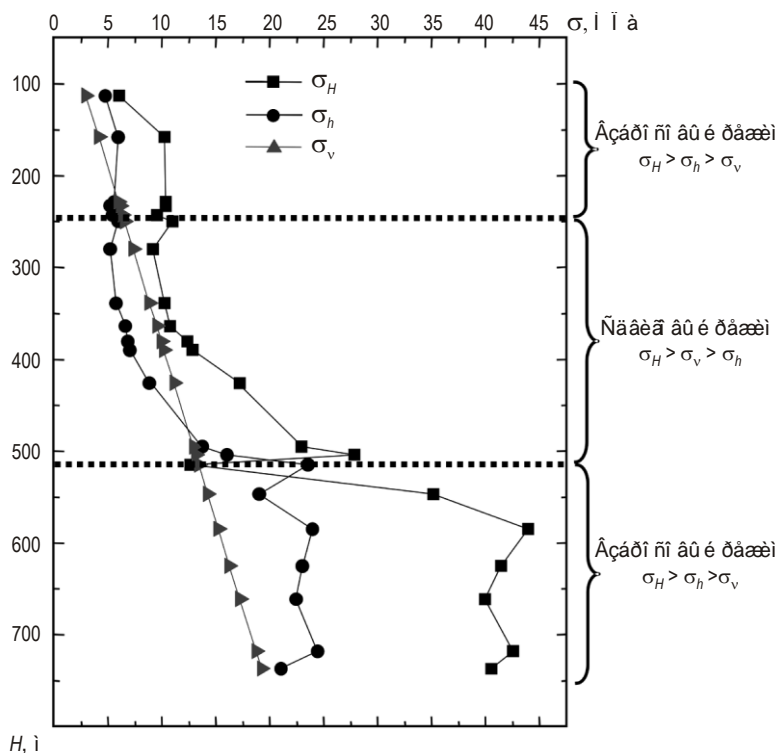


Рис. 5. Характер изменения значений главных нормальных напряжений в разрезе гранитов подземной исследовательской лаборатории Аспё (с использованием данных из [Ask, 2003])

По соотношению величин σ_H , σ_h и σ_v выделяются горизонты пород с различным тектоническим режимом. Расчеты действующих напряжений выполнены по формулам, приведенным выше, при $\rho g = 0.026$ МПа/м; реальные значения σ_H , σ_h и σ_v определены методом гидроразрыва.

Результаты гидравлических тестов (метод гидроразрыва) в скважинах показывают, что режим взброса преобладает примерно до глубины 250 м, а ниже он сменяется режимом сдвига. Далее, примерно со 110 м происходит обратный переход на режим взброса, который сохраняется, по крайней мере, до глубины ~750 м [Ask, Stephansson, Cornet, 2001].

Отметим, что хотя каждая геологическая ситуация уникальна, гранитные массивы лаборатории Аспё и месторождения Антей во многом схожи по строению и свойствам пород [Лаверов и др., 2008].

Выводы

Результаты исследований на образцах, отобранных из разных горизонтах гранитного массива месторождения Антей, показывают, что начиная примерно с 750 м от дневной поверхности, происходит снижение скорости ультразвуковых волн, уменьшаются коэффициент Пуассона и упругие модули. Это свидетельство того, что породы становятся более хрупкими, трещиноватыми и пористыми, вследствие чего происходит резкое снижение их способности к сопротивлению механическому воздействию.

В обстановке повышенных значений фильтрационных параметров должны создаваться условия, благоприятные для циркуляции рудоносных растворов. Однако вопросы реконструкции условий палеотектонической и палеофильтрационной обстановки гидротермального рудообразования на месторождении Антей требуют специального рассмотрения. Полученные нами петрофизические данные могут стать информационной основой для таких построений.

Предварительные расчеты современных главных нормальных напряжений в разрезе массива показывают, что на глубоких горизонтах месторождения (>750 м, горизонт 12 и ниже) тектонический режим сдвига сменяется режимом сброса. Расчеты пока не подкреплены инструментальными данными, но в целом соответствуют тенденциям, наблюдаемым в европейских подземных исследовательских лабораториях, размещенных в гранитных массивах.

Полученные материалы указывают на необходимость инструментальных исследований напряженно-деформированного состояния горного массива месторождения Антей и целесообразность разработки проекта подземного бурения наклонных скважин в целях обнаружения рудных тел, возможно, смещенных в результате тектонической деятельности.

Благодарности

При написании статьи авторы постоянно обращались к материалам безвременно ушедшего из жизни Р.М. Насимова – нашего друга, доброго товарища и прекрасного специалиста.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы I.4П фундаментальных исследований Президиума РАН и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-05-01369_a).

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.
- Козырев А.А., Семенова И.Э., Аветисян И.М.* Создание численной геомеханической модели месторождения “Антей” как основы прогноза напряженно-деформированного состояния массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 4. С.33–40.
- Лаверов Н.П., Петров В.А., Полуэктов В.В., Насимов Р.М., Хаммер Й., Щукин С.И., Бурмистров А.А.* Урановое месторождение Антей – природный аналог хранилища ОЯТ и подземная геодинамическая лаборатория в гранитах // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50, № 5. С.387–413.
- Лехницкий С.Г.* Теория анизотропии упругого тела. М.: Наука, 1977. 416 с.
- Минаев В.А., Петров В.А., Полуэктов В.В., Насимов Р.М.* Упругие параметры вмещающих пород месторождения Антей и их связь с условиями рудовмещения. Четырнадцатая международная конференция “Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле”. М.: ГЕОХИ РАН, ИФЗ РАН, ИГЕМ РАН, ИЭМ РАН, 2013. С.186–189.
- Моделирование полей напряжений в инженерно-геологических массивах / Под ред. Э.В. Калинина. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. 262 с.
- Петрашень Г.И.* Распространение волн в анизотропных упругих средах. Л.: Наука, 1980. 280 с.
- Петров В.А., Насимов Р.М.* Способ определения неоднородностей упругих и фильтрационных свойств горных пород: Патент на изобретение № 2515332 от 13.03.2014 г.

- Петров В.А., Полуэктов В.В., Насимов Р.М., Щукин С.И., Хаммер Й. Природные и техногенные изменения напряженно-деформированного состояния пород на урановом месторождении в гранитах // *Физика Земли*. 2009. № 11. С.86–95.
- Петров В.А., Ребецкий Ю.Л., Полуэктов В.В., Бурмистров А.А. Тектонофизика гидротермального рудообразования: пример молибден-уранового месторождения Антей, Забайкалье // *Геология рудных месторождений*. 2015. Т. 57, № 4. С.327–350.
- Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Петров В.А., Просекин Б.А. Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012. № 3. С.3–13.
- Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Петров В.А., Шевченко Б.Ф., Усиков В.И., Гильманова Г.З. Современное напряженно-деформированное состояние верхних уровней земной коры Амурской литосферной плиты // *Физика Земли*. 2014. № 3. С.104–113.
- Шкуратник В.Л., Николенко П.В. Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород. М.: Московский государственный горный университет, 2012. 15 с.
- Щукин С.И., Петров В.А., Полуэктов В.В., Устинов С.А. Геологическая база данных для моделирования и прогноза деформаций массива пород месторождения Антей Стрельцовского рудного поля // *Горный журнал*. 2015. № 2. С.21–26.
- Ямщиков В.С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов. М.: Недра, 1982. 296 с.
- Ask D. Evaluation of measurement-related uncertainties in the analysis of overcoring rock stress data from Äspö HRL, Sweden: a case study // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2003. N 40. P.1173–1187.
- Ask D., Stephansson O., Cornet F. International Progress Report IPR-01-26. Äspö Hard Rock Laboratory. Integrated stress analysis of hydraulic stress data in the Äspö region, Sweden. Analys of hydraulic fracturing stress measurements and hydraulic test in pre-existing fractures (HTPF) in boreholes KAS02, KAS03 and KLX02. SKB, 2001. P.98–100.
- Fuchs K., Müller B. World stress map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications // *Naturwissenschaften*. 2001. N 88. P.357–371.
- Hudson J.A., Cornet F.H., Christiansson R. ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 1: Strategy for rock stress estimation // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2003. N 40. P.991–998.
- Jaeger J.C., Cook N.G.W. Fundamentals of rock mechanics. Chapman-Hall. 1979. 593 p.
- Zoback M.L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project // *J. Geophys. Res.* 1992. N 97. P.11703–11728.

Сведения об авторах

МИНАЕВ Василий Александрович – младший научный сотрудник, аспирант, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН). 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35. Тел.: 8(499) 230-84-46. E-mail: minaev2403@mail.ru

ПЕТРОВ Владислав Александрович – член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН). 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35. Тел.: 8(499) 230-82-25. E-mail: vlad243@igem.ru

ПОЛУЭКТОВ Валерий Викторович – научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН). 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35. Тел.: 8(499) 230-82-25. E-mail: vapol@igem.ru

STRESS-STRAIN STATE AND VARIATIONS IN THE ELASTIC PARAMETERS OF THE HOST GRANITOIDS AT DIFFERENT DEPTHS, THE MO-U ANTEI DEPOSIT, TRANSBAIKAL

V.A. Minaev, V.A. Petrov, V.V. Poluektov

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

Abstract. The results of petrophysical studies of the host granitoids samples from deep levels of the molybdenum-uranium Antei deposit, the Streltsovskoe ore field (SE Transbaikal), are considered. With the increase in depth, the samples observed demonstrated the decrease in velocity of ultrasonic waves and the reduction of values of the Poisson's ratio and elastic moduli, that suggests a sharp decline in the ability of rocks to resist mechanical stress and increase in their fragility and fracture porosity. The degree of disturbance of the crystalline matrix also increases with the depth. The higher values of flow parameters imply conditions that are favorable to the circulation of ore-bearing solutions and ore localization. Accordingly, an increase in quantity and thickness of ore bodies with the depth can be expected. However, the real situation in the deposit is totally different. Both the quantity and the thickness of ore bodies decrease with the depth. Preliminary calculations of the modern normal stresses indicate the change in tectonic regime from tension to compression at deep (>750 m) horizons of the deposit. Thus the instrumental studies of the stress-strain state of the Antei deposit should be conducted and the project on the directional drilling for detection of hidden ore bodies should be developed.

Keywords: granitoids, main normal stresses, uranium deposit, petrophysical parameters, tectonic regime, ultrasound.

References

- Ask D., Stephansson O., and Cornet F. International Progress Report IPR-01-26. Äspö Hard Rock Laboratory. Integrated stress analysis of hydraulic stress data in the Äspö region, Sweden. Analys of hydraulic fracturing stress measurements and hydraulic test in pre-existing fractures (HTPF) in boreholes KAS02, KAS03 and KLX02. SKB, 2001, pp. 98-100.
- Ask D. Evaluation of measurement-related uncertainties in the analysis of overcoring rock stress data from Äspö HRL, Sweden: a case study, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2003, no. 40, pp. 1173–1187.
- Burmistrov A.A., Starostin V.I., Dergachov A.L., and Petrov V.A. *Strukturno-petrofizicheskiy analiz mestorozhdeniy poleznych iskopaemih* (Structural and petrophysical analysis of mineral deposits). Moscow: MAKS Press, 2009 (in Russ).
- Fuchs K. and Müller B. World stress map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications, *Naturwissenschaften*, 2001, no 88, pp. 357–371.
- Hudson J.A., Cornet F.H., and Christiansson R. ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 1: Strategy for rock stress estimation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2003, no 40, pp. 991-998.
- Jaeger J.C. and Cook N.G.W. *Fundamentals of rock mechanics*. Chapman-Hall. 1979.
- Kozyrev A.A., Semenova I.E., and Avetisyan I.M. Development of numerical geomechanical model of Antey deposit as a base of rock mass stress-strain state forecasting. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal), 2014, no. 4, pp. 33-40 (in Russ).
- Laverov N.P., Petrov V.A., Poluektov V.V., Nasimov R.M., Hammer J., Burmistrov A.A., and Shchukin S.I. The Antei uranium deposit: A natural analogue of an SNF repository

- and an underground geodynamic laboratory in granite, *Geology of Ore Deposits*, 2008, vol. 50, no. 5. pp. 339-361.
- Minaev V.A., Petrov V.A., Polouektov V.V., and Nasimov R.M. The elastic parameters of the host rocks Antei deposit and the terms of their relationship with ore location, In Chetirnadcataya Mezhdunarodnaya Konferenciya «Phisiko – himicheskie i petrofizicheskie issledovaniya v naukah o Zemle» (Fourteenth International Conference "Physical and chemical and petrophysical studies in earth sciences), Moscow: Vernadsky Institute, IPE RAS, IGEM, IEM RAS, 2013. pp. 186-189 (in Russ).
- Modelirovanie poley napryazheniy v inzhenerno-geologicheskikh massivah* (Modelling of stress fields in geotechnical arrays), ed. E.V. Kalinin, Moscow: Izd. University Press, 2003 (in Russ).
- Petrov V.A., Polouektov V.V., Nasimov R.M., Shchukin S.I., and Hammer J. Natural and technogenic changes in the mode of rock deformation in the uranium deposit in granites, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2009, vol. 45, no. 11. pp. 1012-1018.
- Petrov V.A. and Nasimov R.M. Sposob opredeleniya neodnorodnostey uprugikh i filtratsionnokh svoystv gornih porod (A method of determining the elastic and filtration properties of rocks). The patent for the invention № 2515332 from 13.03.2014.
- Petrov V.A., Rebetsky Yu.L., Poluektov V.V., and Burmistrov A.A. Tectonophysics of Hydrothermal Ore Formation on the Example of the Antei Mo–U Deposit, Transbaikalia, *Geology of Ore Deposits*, 2015, vol. 57, no. 4, pp. 292-312
- Rasskazov I.Yu., Saksin B.G., Petrov V.A., and Prosekin B.A. Geomechanics and seismicity of the antey deposit rock mass, *Journal of Mining Science*, 2012, vol. 48, no. 3, pp. 405-412.
- Rasskazov I.Yu., Saksin B.G., Usikov V.I., Petrov V.A., Shevchenko B.F., and Gil'manova G.Z. Present-day stress-strain state in the upper crust of the Amurian lithosphere plate, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 444-452.
- Reinecker J., Heidbach O., Tingay M. et al. The 2005 release of the World Stress Map (www.world-stress-map.org).
- Shkuratnik V.L. and Nikolenko P.V. Metodi opredeleniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornih porod (Methods for determination of stress-strain state of the rock mass). Moscow: Moscow State Mining University, 2012, pp. 15 (in Russ).
- Shchukin S.I., Petrov V.A., Polouektov V.V., and Ustinov S.A. Geologicheskaya baza danih dlya modelirovaniya i prognoza deformatsiy massiva porod mestorozhdeniya Antey Streltsovskogo rudnogo polya (Geological data base for modeling and prediction of deformation of rock mass of the Antei deposit of the Streltsovskoe ore field), *Mining Journal*, 2015, no. 2, pp. 21-26
- Yamshchikov V.S. Metodi i sredstva issledovaniya i kontrolya gornih porod i processov (Methods and tools for the study and control of rocks and processes), Moscow: Nedra, 1982 (in Russ).
- Zoback M.L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project, *J. Geophys. Res.*, 1992, no. 97, pp. 11703–11728.