

УДК 550.83.04:550.812:553.078

В.А. Минаев¹, А.А. Бурмистров², В.А. Петров³, В.В. Полуэктов⁴

ВЫЯВЛЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА ОРУДЕНЕНИЯ НА УРАНОВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ АНТЕЙ (ЮГО-ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)⁵

Определение петрофизических параметров в сочетании с геолого-структурным и минералого-петрографическим изучением пород необходимо для оценки условий локализации уран-молибденовых руд, перспектив их отработки и оценки масштаба оруденения на крупнейшем в России жильно-штокверковом месторождении Антей, расположенном в гранитоидном основании Стрельцовской кальдеры в Юго-Восточном Забайкалье.

Ключевые слова: гранитоиды, петрофизическая аномалия, петрофизические параметры, месторождение урана.

Determination of petrophysical parameters in conjunction with the geological-structural and mineralogical and petrographic study of rocks is necessary to assess the conditions of localization of uranium-molybdenum ore prospects of their processing and assessment of the extent of mineralization at largest vein-stockwork Antei deposit in Russia, located in the granitoid basis of Strel'tsovskaya caldera in the southeastern Transbaikalia.

Key words: granitoids, petrophysical anomaly, petrophysical parameters, uranium deposit.

Введение. Месторождение Антей молибден-урановой рудной формации локализовано в Стрельцовском рудном поле, которое находится в 460 км на юго-восток от г. Чита. Месторождение разрабатывается подземным способом. В настоящее время глубина отработки приближается к 800 м.

Рудное поле приурочено к Стрельцовской кальдере, расположенной в Тулукуевской вулканно-тектонической структуре, которая расчленена по всей площади зонами разломов разной мощности и протяженности. Месторождение залегает в кристаллическом фундаменте кальдеры и представлено штокверково-жильными крутопадающими рудными телами в Центральной зоне разломов меридионального простирания с широкой (до нескольких десятков метров) областью динамического влияния [Лаверов и др., 2008]. В Центральную зону входят разлом 13 (прослеживается из фундамента в вулканогенный чехол, контролирует рудную минерализацию на глубоких горизонтах) и шов 160 (относится к основным рудовмещающим разрывным нарушениям, которые развиты в висячем боку разлома 13 и ограничены по восстанию подошвой чехла) [Петров и др., 2009]. Месторождение перекрыто

мощной терригенно-вулканогенной толщей чехла кальдеры (рис. 1).

Актуальность исследований по выявлению и оценке петрофизических аномалий на основе петрофизического изучения вмещающих пород определяется необходимостью оптимизации поисков скрытых рудных тел на глубоких горизонтах месторождения. Теоретические и методические аспекты обнаружения и практическое использование рудно-петрофизических аномалий для поисков и прогнозной оценки рудных месторождений впервые рассмотрены В.И. Старостиным и его учениками в 1970–1980-е гг. в процессе разработки нового направления структурных исследований в рудной геологии — структурно-петрофизического анализа [Бурмистров и др., 2009]. В его основе лежит теоретически установленная и инструментально проверенная закономерная количественная связь физико-механических и других физических свойств вмещающих пород и руд с их составом и структурой, что отражает условия их формирования, тип и интенсивность наложенных преобразований.

Структурно-петрофизический анализ дает возможность в короткие сроки и с малыми финансовыми затратами проводить статистически

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), мл. науч. с.; *e-mail:* minaev2403@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, доцент, канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* burm@geol.msu.ru

³ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), зам. директора по научной работе, чл.-корр. РАН, докт. геол.-минерал. н.; *e-mail:* vlad243@igem.ru

⁴ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), науч. с.; *e-mail:* varol@igem.ru

⁵ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 15-05-01369).

достоверную количественную оценку различных видов преобразования пород и руд (тектонические, метасоматические и др.), выделять петрофизические типы сред структурообразования и барьеры рудоотложения, осуществлять прогнозную оценку оруденения разных структурно-морфологических типов. Результаты петрофизических исследований приобретают все большее значение, способствуя выработке рациональных направлений поисковых, геологоразведочных и эксплуатационных работ, особенно при их проведении на глубоких горизонтах. Важное условие эффективности этих работ — сочетание рудно-петрофизических данных со структурной и вещественной информацией, получаемой на разных масштабных уровнях исследований.

С учетом этого авторы статьи создали прогнозно-поисковую рудно-петрофизическую модель месторождения на основе обобщения и анализа результатов своих многолетних исследований. Работы включали изучение и площадное картирование петрографического состава пород в комплексе с измерением ряда физико-механических, электрических, магнитных и ядерно-физических свойств на 5 глубоких горизонтах (горизонты 9–13) месторождения Антей. В итоге этими исследованиями был охвачен примерно 250-метровый интервал разреза месторождения по глубине. Результаты исследований следует рассматривать как первый этап этой работы. В дальнейшем в анализ будут вовлечены геолого-структурные и геодинамические данные, что позволит увеличить эффективность использования рудно-петрофизической модели в прогнозных целях.

Основные типы рудовмещающих пород. Вмещающие породы месторождения Антей представлены палеозойскими неизменными и метасоматически преобразованными гранитоидами (рис. 2).

В палеозое произошла высокотемпературная калишпатизация гранитов с образованием зон калишпатитов, в мезозое сформировались предрудные низкотемпературные гидрослюдизированные граниты — гидрослюдизиты. Результаты картирования этих пород вынесены на погоризонтные планы (рис. 3, А–Д).

Калишпатиты обычно образуют узкие зоны восток-северо-восточного простирания и крутого падения в южных румбах. Низкотемпературные гидрослюдизиты развиты вдоль север-северо-восточных зон рудовмещающих разломов и иногда вдоль более мелких субпараллельных им разрывных нарушений и представлены двумя метасоматическими зонами — внутренней и внешней. Внутренняя зона сложена интенсивно проявленными метасоматитами, которые локализованы в центральных частях ореола метасоматитов и образуют серию узких субпараллельных полос. Внешняя зона представлена слабо проявленными гидрослюдизитами большей мощности. В экзоконтактах

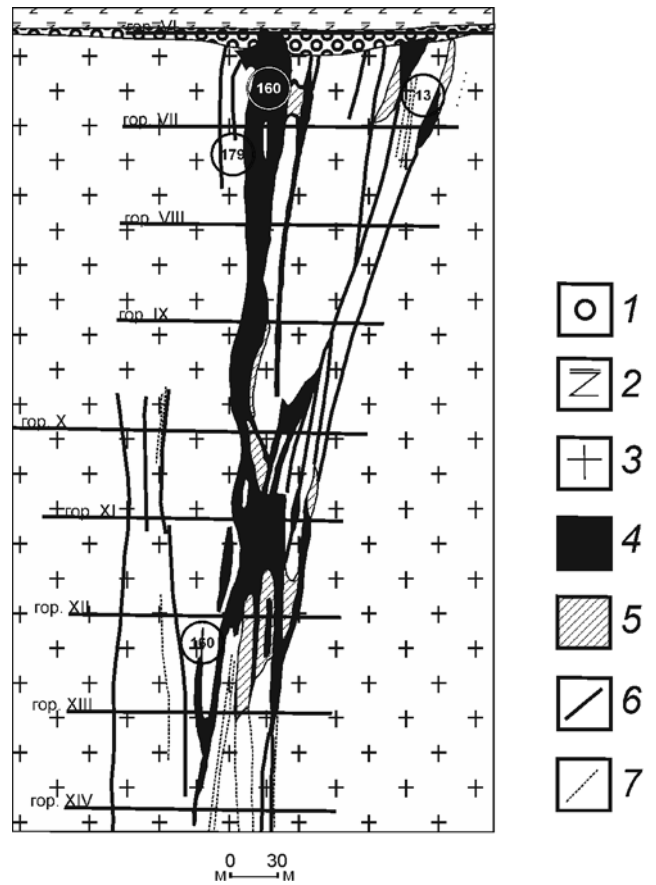


Рис. 1. Разрез месторождения Антей: 1 — базальные конгломераты; 2 — дациты, туфобрекчи дацитов; 3 — средне-, неравнозернистые гранитоиды; 4 — урановые рудные тела; 5 — молибден-урановые рудные тела; 6 — разломы; 7 — зоны интенсивных метасоматических и деформационных преобразований, по [Ищукова, 1996]

рудных тел (160-, 161- и 13-го разломов) широко развиты рудосопровождающие альбит-гематитовые метасоматиты небольшой мощности. В масштабе погоризонтных планов они не показаны.

Методика петрофизических исследований. В изученные петрофизические параметры вошли следующие: минеральная плотность (плотность твердой фазы пород, d , г/см³), эффективная пористость ($P_{эф}$, %), период полунасыщения ($T_{1/2}$, ч), скорость продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн (км/с), модуль Юнга (E , МПа), превышение уровня естественного гамма- ($\Delta\gamma$, 100·МЗв/ч), бета- ($\Delta\beta$, 100·см⁻³·с⁻¹) и альфа-излучения ($\Delta\alpha$, 100·см⁻³·с⁻¹) над фоновыми, диэлектрическая проницаемость (ϵ), удельное электрическое сопротивление (ρ , МОм·см), магнитная восприимчивость (mag , 10⁻⁵ ед. СИ).

Для каждого горизонта изучено по 1–3 образца с каждой точки наблюдения, положение которых показано на рис. 3, А–Д. На профилях изучено по одному образцу из каждого интервала (L — расстояние от 13-го разлома, м).

Плотность, период полунасыщения и эффективную пористость определяли по результатам

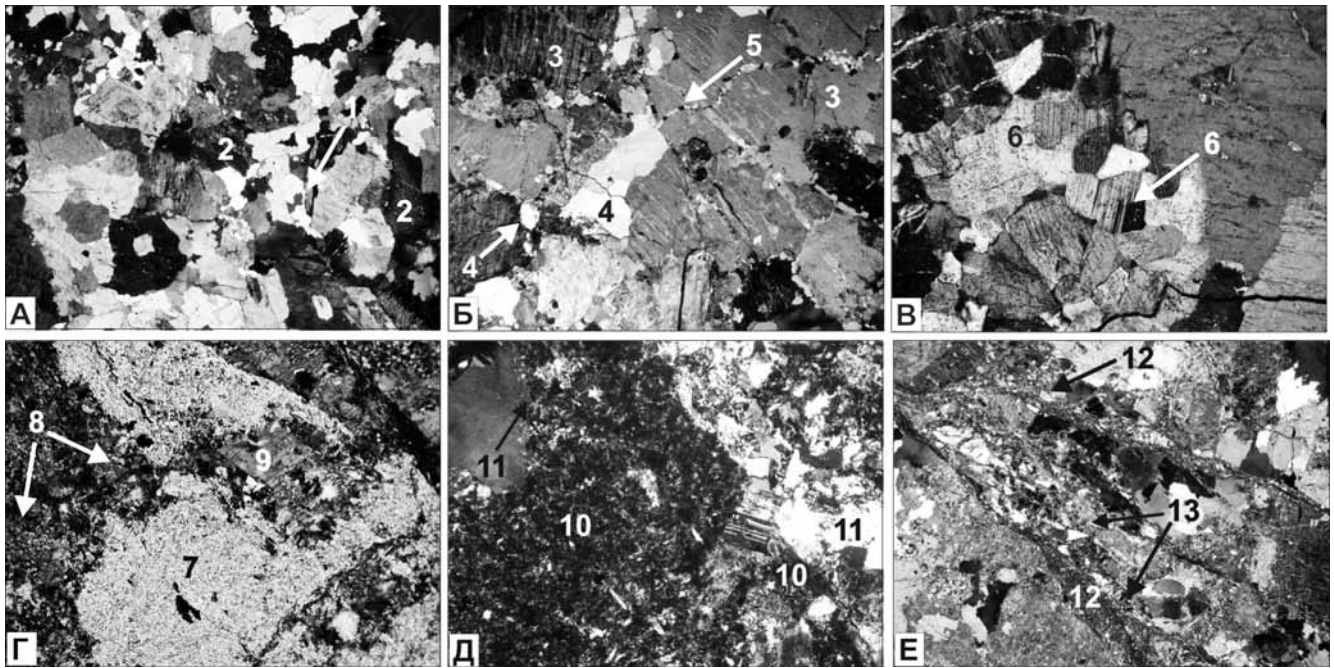


Рис. 2. Типы гранитоидов месторождения Антей: А — неизменный биотитовый гранит с гипидиоморфнозернистой гранитовой структурой, биотит частично мусковитизирован (1) и замещен хлоритом (2); Б — высокотемпературный калишпатит с порфиробластами микроклина (3) и характерными включениями гранитного (4) и прожилковидного кварца (5); В — высокотемпературный альбитит с тонкосдвойникованным шахматным альбитом (6); Г — гидрослюзидиты (7) с метасоматическими карбонатом, хлоритом (8) и частичным замещением калиевого полевого шпата гидрослюдой (9); Д — рудосопровождающий альбититовый метасоматит, альбит сдвойникован, интенсивно импрегнирован гематитом (10) и отчетливо замещен пострудным кварцем (11); Е — зоны интенсивного катаклаза, брекчирования с развитием окварцевания (12) и микропрожилков карбоната (13)

гидростатического взвешивания сухих, а также частично и полностью насыщенных образцов в процессе их свободного водонасыщения в соответствии с методикой, приведенной в работе [Бурмистров и др., 2009]. Образцы представляли собой пластины квадратной формы со стороной 5 см и толщиной 1 см.

Плотность и пористость рассчитаны по следующим формулам:

$$d=0,998 P_c / (P_c - P_{н.в.}), \text{ г/см}^3,$$

$$P_{\text{эф}}(\%)=100 \cdot (P_{н.в.} - P_{с.в.}) / (P_c - P_{с.в.}),$$

где P_1 — масса образца в воде после первой минуты насыщения, P_c — масса сухого образца в воздухе, $P_{с.в.}$ — масса сухого образца в воде, $P_{н.в.}$ — масса полностью насыщенного образца в воде.

Минеральная плотность возрастает при увеличении содержания минералов с большим удельным весом. Авторами установлено, что эффективная пористость повышается в гидрослюзидитах, но понижается в высокотемпературных калишпатитах.

Период полунасыщения ($T_{1/2}$) пород устанавливается для времени после 1-й минуты насыщения, когда основная часть крупных пор (с диаметром ~0,1 мм и более) уже заполнена водой. Этот параметр позволяет оценить соотношение относительно более крупных и мелких классов пор в общей структуре порового пространства для микропористости. При его относительно больших значениях в породе преобладают более

мелкие классы пор, но по мере повышения степени метасоматических преобразований пород он также возрастает из-за увеличения количества пор сложной формы, насыщение которых обычно происходит дольше.

Для расчета $T_{1/2}$ определяются ближайшие моменты замеров перед (t_i) и после (t_j) наступления полунасыщения путем сравнения веса образца в эти моменты (P_i, P_j) с расчетным значением его массы при полунасыщении ($P_{1/2}$). Эти данные вводятся в расчетные формулы [Бурмистров и др., 2009]:

$$T_{1/2} (\text{часы})=t_i+(t_j^k/t_i^k-1),$$

где $k=(P_{1/2}-P_i)/(P_j-P_i)$.

Среди упругих параметров определяли только модуль Юнга (E), хотя ранее были рассчитаны и другие динамические модули. Как известно, упругие параметры тесно коррелируют между собой, так как расчетные формулы для них включают одни и те же исходные параметры. Значения E рассчитаны по величинам скорости продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн, измеренных в водонасыщенных образцах. Это позволило исключить влияние пористости и микротрещиноватости (прямая связь E с $P_{\text{эф}}$). Известно, что при насыщении водой значения скорости продольных волн становятся достаточно близки к таковым в твердой фазе пород [Бурмистров и др., 2009].

Для измерений использовали комплекс аппаратуры, состоящий из генератора-приемника

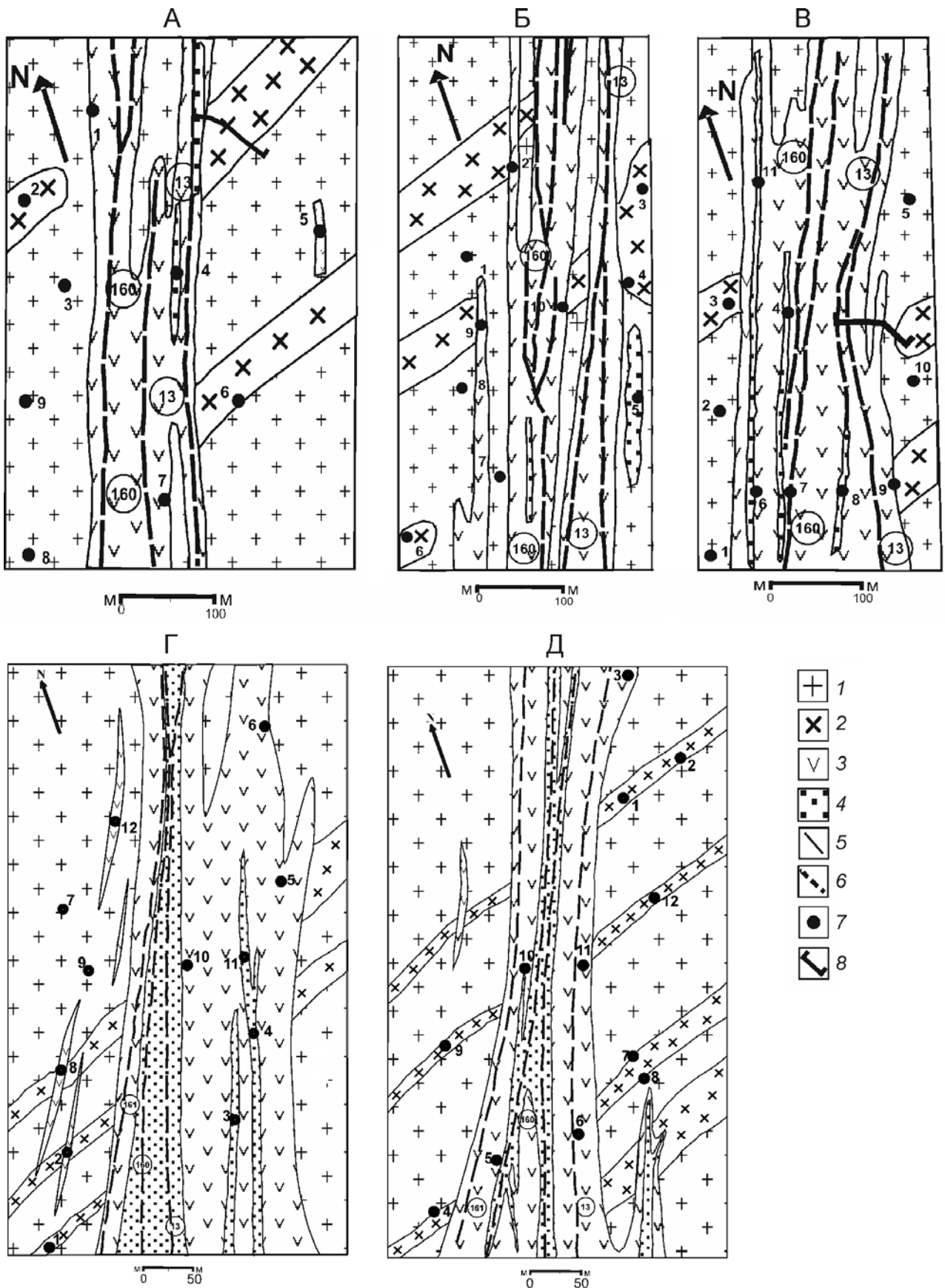


Рис. 3. Распространение метасоматических преобразований пород на гипсометрических уровнях 9-, 10-, 11-, 12-, 13-го горизонтов (планы А, Б, В, Г, Д соответственно): 1 – биотитовые и лейкократовые разновидности гранитоидов; 2 – высокотемпературные калишпатиты; 3 – слабо проявленные гидрослюдзиты; 4 – интенсивно проявленные гидрослюдзиты; 5 – геологические границы; 6 – разломы; 7 – точки отбора образцов; 8 – профили отбора образцов

ультразвуковых сигналов «Panametrics PR5072» (США) и пары излучателей P - и S -волн «Panametrics» с собственной частотой колебаний 1 МГц. Образцы представляли собой кубики с гранью не менее 50 мм.

Получаемые волновые картины оцифровывали с помощью осциллографа «TiePie508» (Нидерланды). В качестве контактной смазки применяли гель полисахаридов. Скорость волн измеряли в образцах после полного насыщения их водой, которое фиксировалось по прекращению увеличения их массы. Для образцов неправильной формы (отобранных в профилях) использовался ультразвуковой тестер УК1401 (Россия), работающий на частоте 50 кГц, с точностью измерения времени прохождения сигнала 0,1 мкс. Расчеты выполнены по стандартным формулам теории упругости [Петрофизика..., 1992]:

$$E=2G(1+\mu); \mu=(V_p^2-2V_s^2)/2(V_p^2-V_s^2); \\ G=(V_s)^2 \cdot d,$$

где E — модуль Юнга, μ — коэффициент Пуассона, G — модуль сдвига.

Упругий модуль пород снижается с ростом их пористости и содержания гидрослюд, а повышается в низкопористых калишпатитах, которые были перекристаллизованы при высоких PT -параметрах.

Магнитную восприимчивость измеряли капаметром ПИМВ-1М (Россия) с точностью $0,1 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Ее значения повышаются в неизменных биотитовых гранитах, а понижаются в гидрослюдизитах.

Уровни альфа-, бета- и гамма-излучения замерены радиометром-дозиметром ДРБП-03 (Россия), повышенные значения связаны с присутствием минералов урана и продуктов его распада (радона, калия-40 и др.).

Прибором АК ИП 6102 (измеритель RLC, Китай) измеряли значения емкости (C , пкФ) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$). При расчетах значений диэлектрической проницаемости (ϵ) и удельного электросопротивления (ρ , МОм·см) учитывалось искажение величин C и $\text{tg}\delta$. Искажение устанавливалось по значениям этих величин для воздуха при разных положениях датчика прибора с определением поправочного коэффициента: $k=\epsilon_{\text{воздуха}}/1$, (ϵ воздуха равна единице). Расчеты выполнены по стандартным формулам [Петрофизика..., 1992] с введением в них поправочного коэффициента:

$$\epsilon=(C/k) \cdot H/(0,085S), \\ \rho=(S/H)/[2\pi(\text{tg}\delta/k) \cdot f \cdot (C/k)],$$

где H , S — средняя толщина и площадь образца (см); $f=10$ кГц — частота колебаний электрического поля прибора.

Повышение величины ϵ и ее дисперсии и снижение ρ ($\text{tg}\delta$) в некоторых случаях связано с увеличением содержания Fe-содержащих силикатов, рудных минералов, а в гидрослюдизитах (как в нашем случае) — кристаллизационной и адсорбированной воды.

В связи с необходимостью провести интегральный анализ этой обширной информации для каждого образца рассчитывали комплексные аномальные петрофизические коэффициенты (КАП) по следующей формуле:

$$\text{КАП}_{\text{обр}}=\{[A_{\text{обр}}/A_{\text{фон}}] \cdot \dots \cdot [(M_{\text{обр}}/(M_{\text{фон}})] / \\ \{[N_{\text{обр}}/N_{\text{фон}}] \cdot \dots \cdot [P_{\text{обр}}/P_{\text{фон}}]\},$$

где $A_{\text{обр}} \dots$, $M_{\text{обр}}$ — первая группа свойств; $N_{\text{обр}} \dots$, $P_{\text{обр}}$ — вторая группа свойств (между свойствами, входящими в одну группу, корреляция положительная, а между свойствами из разных групп — отрицательная либо отсутствует; отношения свойств второй группы входят в знаменатель приведенного выше выражения для расчета КАП); $A_{\text{фон}}$ — фоновое значение свойства A (его среднее значение для неизменных гранитов на данном горизонте).

Для сопоставления петрофизических данных с продуктивностью (средним содержанием) и масштабом (площадные запасы, т.е. суммарный метропроцент) развития оруденения по данным геологических планов 9-, 11- и 13-го горизонтов (составители М.М. Бронникова, С.В. Сурмин и др., 2001) рассчитаны средние значения содержания урана ($C_{\text{ср}}$, у.е.), средние значения мощности рудных тел и метропроценты в контурах промышленного оруденения. Интенсивность проявления петрофизических аномалий оценивали по средним значениям КАП гидрослюдизитов каждого горизонта: для слабо проявленных — КАП3, для сильно проявленных — КАП4. Площадь аномалий ($S_{\text{ан}}$, м²) оценена условно — по площади развития гидрослюдизитов двух типов, так как разреженная сеть наблюдений исключала возможность приемлемой интерполяции петрофизических данных. Общий масштаб аномалий ($M_{\text{ан}}$) оценивали по формуле

$$M_{\text{ан}}=S_{\text{ан}}3\text{КАП3}+S_{\text{ан}}4\text{КАП4}.$$

Точность (абсолютная погрешность, Δ) определений петрофизических параметров, рассчитываемых по формулам (функциям « y »), оценивали по относительной погрешности (f_y) по известным из метрологии соотношениям [Определение..., 1977]:

$$f_y=dy/y=d(\ln y), \Delta=f_y \cdot y.$$

При этом отрицательным слагаемым в полученных выражениях присваивался знак «+», так как требовалось получить максимальное значение погрешности. Точность измеряемых свойств соответствовала цене деления прибора.

Для расчета точности определения плотности и эффективной пористости получены следующие формулы (обозначения параметров приведены выше):

$$\Delta d = [2P_c \cdot \Delta P / (P_c - P_{нв})^2] \cdot d_{\text{воды}},$$

$$\Delta P_{\text{эф}} \approx 200 \cdot \Delta P / (P_c - P_{\text{св}}).$$

С учетом точности взвешивания образцов на электронных весах марки «Acculab600» («Sartorius Group») $\Delta P = 0,01$ г при объеме образцов 25 см^3 , их масса $P_c = 60 \div 65$ г, $\Delta d \approx 0,002$ г/см³, $\Delta P_{\text{эф}} \approx 0,08\%$.

Для остальных параметров определены значения f_y . Время насыщения ($T_{1/2}$, ч) измеряли в начале процесса с точностью $\Delta t \approx 0,02$ ч для минутных и $\Delta t \approx 0,2$ ч для часовых интервалов. Принимая $\Delta t \approx 0,2$ ч для $t_i < T_{1/2} < t_j$ до первых часов, $k \approx 0,5$; $\Delta k = 4$ и $\Delta P = 0,04$, получим:

$$f_{(T_{1/2})} = 100 \cdot [\Delta t / t_i + (\Delta k / k) \cdot (\Delta t / t_i)] + [(\Delta k / k) \cdot \Delta t / t_j],$$

$$\Delta k = 4 \Delta P k, f_{(T_{1/2})} \approx 20\%.$$

Погрешность определения V_p и V_s после калибровки на эталонных образцах кварца и стали не превышала 1% [Минаев и др., 2013], поэтому для упругих параметров в целом и модуля Юнга (E) в частности получим:

$$f_E = 100 \cdot (\Delta \mu / \mu + 2 \cdot \Delta G / G),$$

$$\Delta \mu / \mu = 100\% (4 \Delta V / V + 2 \Delta V / V),$$

$$\Delta G / G = 2 \Delta V / V + \Delta d / d.$$

Если $V_p = 3500$ м/с и $V_s = 2000$ м/с, то $\Delta V = 20$ м/с, $f_E \approx 8\%$.

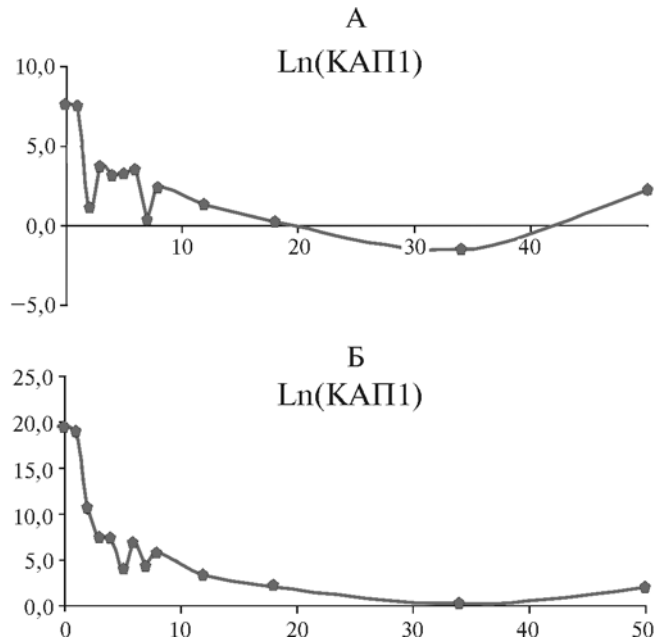


Рис. 4. Локальные петрофизические аномалии, выявленные на профилях 9-го (А) и 11-го (Б) горизонтов с северо-запада на юго-восток, по оси абсцисс — расстояние (м) от 13-го разлома

Для диэлектрической проницаемости при точности замера размеров образца $\Delta H = \Delta L = 0,1$ см, обычной для образцов $\Delta C / C \approx 0,02$, $\Delta t g / t g \approx 0,01$:

$$f_\epsilon = 100 \cdot (\Delta C / C + \Delta H / H + 2 \Delta L / L) \approx 16\%,$$

$$f_{(\rho)} = 100 \cdot (3 \Delta L / L + \Delta C / C + \Delta H / H + \Delta t g / t g) \approx 19\%.$$

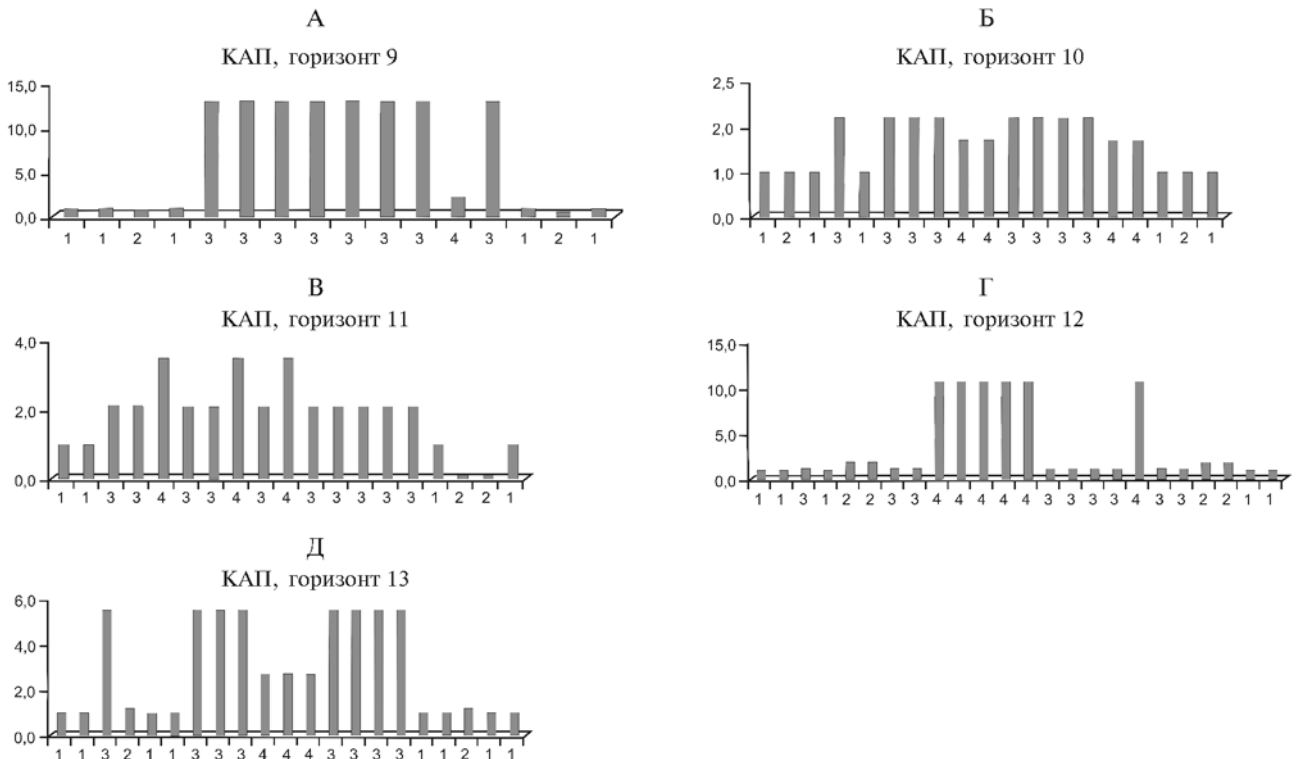


Рис. 5. Петрофизические аномалии на горизонтах А–Д (изменение средних значений КАП с северо-запада на юго-восток; цифры на горизонтальной оси соответствуют типам пород, указанным на рис. 3 и в табл. 1; цена деления оси — 10 м

Рис. 6. Дендрограмма взаимных связей для 10 переменных между петрофизическими свойствами образцов с горизонтов 9–13 (расстояние объединения равно разности единицы и значения, коэффициент корреляции Пирсона); ДИ — диэлектрическая проницаемость; СОП — удельное электрическое сопротивление; А, В, Г — замеренные уровни альфа-, бета-, гамма-излучения соответственно; Π_3 — эффективная пористость

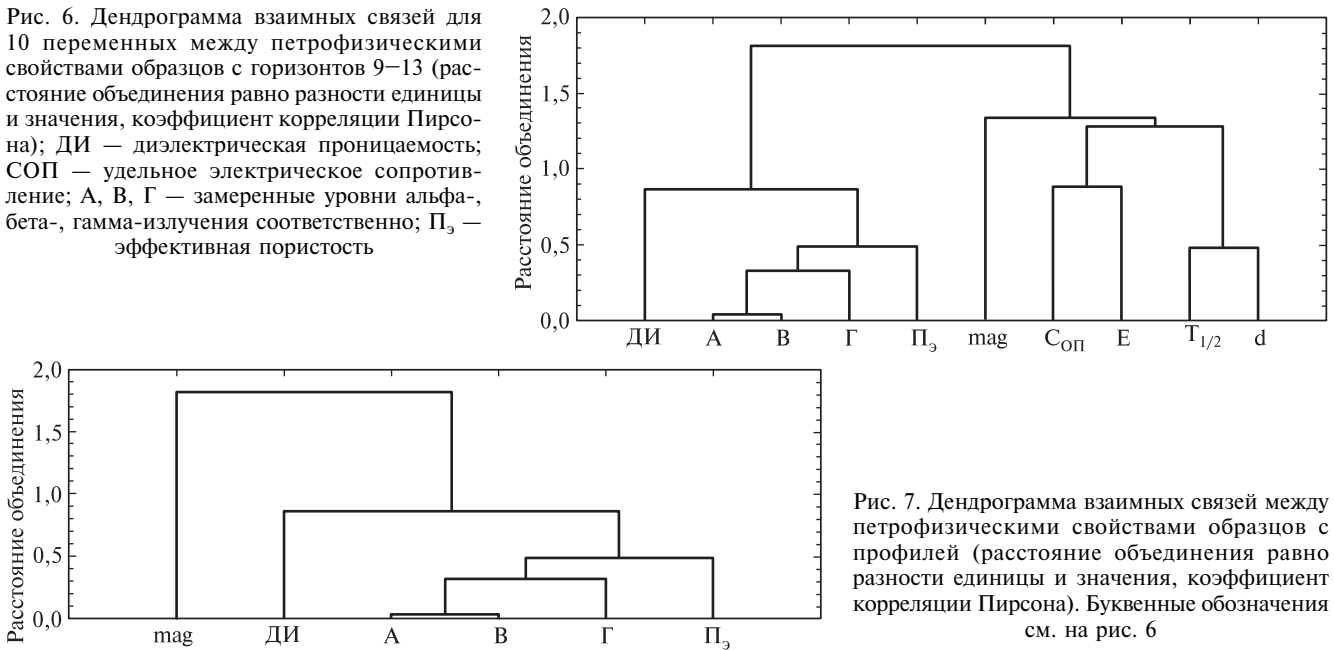


Рис. 7. Дендрограмма взаимных связей между петрофизическими свойствами образцов с профилей (расстояние объединения равно разности единицы и значения, коэффициент корреляции Пирсона). Буквенные обозначения см. на рис. 6

Доверительные интервалы для средних из n значений КАП определены приближенно по следующей формуле [Богацкий и др., 1976]:

$$\Delta (\%) = 200 \cdot [(X_{\max}/X_{\text{ср}}) - 1] / (n - 1),$$

где X_{\max} , $X_{\text{ср}}$ — наибольшее и среднее значения параметра в выборке.

Величина Δ для средних значений КАП по типам пород на каждом горизонте в большинстве случаев составляла 30–40%.

Результаты исследований и их обсуждение.

Благодаря использованию комплексных аномальных петрофизических коэффициентов анализ информации значительно упрощается. В масштабе горизонтов петрофизические аномалии выражены не так контрастно, как на профилях, где локальные аномалии выделяются четче (рис. 4, 5), что видно по средним значениям КАП для профилей (табл. 1). Локальные аномалии прежде всего связаны с зонами динамического влияния разломов, с интенсивным проявлением гидрослюдизитов, зон гематитизации и в некоторых местах с адсорбцией в них продуктов распада урана.

Значения КАП рассчитаны по 5 свойствам. В первую группу вошли: d , $T_{1/2}$, $\Delta\beta$, $\Pi_{\text{эф}}$, а во вторую — Е. Выбор свойств основан на анализе их изменения по средним значениям в метасоматитах (табл. 1). Значения свойств первой группы обычно возрастают с ростом степени изменений гранитов, а во второй — убывают. В калишпатитах значения Е в среднем более высокие, однако это не сильно повлияло на величины КАП, главное, что средние значения КАП для гидрослюдизитов имеют резко повышенные значения (табл. 1).

При расчетах КАП1 (КАП для профилей) для выявления локальных петрофизических аномалий на профилях на 9-м и 11-м горизонтах использован более широкий набор свойств. По

результатам ранговой корреляции и кластерного анализа (рис. 6, 7) выявлены свойства, которые образуют две группы с наиболее высокой обратной связью между ними. Во вторую группу здесь попадает только магнитная восприимчивость. Контрастность изменения КАП1 настолько высока, что графики его изменения по профилям даны в логарифмической шкале (рис. 5). Это связано с заметным ростом дисперсии значений свойств в начале 50-метровой зоны удаления от 13-го разлома.

Рост дисперсии свойств в метасоматитах в целом хорошо виден на обобщенных диаграммах (рис. 8, 9). Таким образом, этот факт также может служить критерием выделения ближних и дальних экзоконтактов скрытых рудных тел. Значительно более высокая интенсивность локальной аномалии (а также дисперсии значений КАП1) на профиле 11-го горизонта по сравнению с профилем на 9-м горизонте связана с тем, что на 11-м горизонте 13-й разлом — рудовмещающий, в отличие от его продолжения на 9-м горизонте, при этом на 11-м горизонте он находится на более близком расстоянии от 160-го разлома.

Образец с точки наблюдения № 7 на 9-м горизонте имеет очень высокое значение КАП, равное 64,1. Это отчасти связано с повышенным уровнем альфа- и бета-излучения. Высокий уровень их значений также зафиксирован в некоторых образцах на расстоянии от 1 до 7 м от 13-го разлома на профилях 9-го и 11-го горизонтов, в то время как уровень гамма-излучения повышен только на расстоянии до 1 м от рудного тела 13-го разлома на профиле 11-го горизонта. Это может указывать на развитие ореолов продуктов распада урана. Таким образом, получена важная информация для прогнозирования скрытых рудных тел при поисковых работах.

Таблица 1

Петрофизические характеристики образцов, отобранных на разных горизонтах месторождения Антей

Число образцов	Тип пород	d	$T_{1/2}$	$P_{эф}$	E	mag	$\Delta\gamma$	$\Delta\beta$	$\Delta\alpha$	ε	ρ	КАП
9-й горизонт												
4	1	2,66	1,7	0,5	75	13	2	7	3	4	511	1
2	2	2,61	0,6	0,8	71	12	1	9	7	4	688	0,6
3	3	2,66	2,6	0,9	67	17	6	36	7	4	492	12,8
2	4	2,68	2,5	1,0	70	15	1	6	3	3	564	2,3
Средние значения по профилю на горизонте 9												
		2,63	5	1,2	33	11	1	8	10	9	410	3,9
10-й горизонт												
4	1	2,66	1,5	0,6	77	15	1	5	6	3	711	1,0
2	2	2,63	1,2	0,6	75	14	1	10	7	3	1050	1,0
5	3	2,65	2,1	1,0	70	12	1	7	2	5	544	2,2
2	4	2,67	0,7	2,4	60	14	1	6	1	4	598	1,7
11-й горизонт												
5	1	2,65	1,7	0,6	76	15	1	6	4	3	743	1,1
1	2	2,67	0,1	1,1	77	17	3	4	1	3	746	0,1
3	3	2,63	1,5	1,3	71	11	2	6	8	3	907	2,1
4	4	2,64	1,8	1,7	68	12	1	7	5	3	838	3,5
Средние значения по профилю на горизонте 11												
		2,63	11	1,3	33	9	15	155	99	15	251	13,9
12-й горизонт												
3	1	2,61	2,5	1,2	36	14	2	9	5	3	903	1,0
4	2	2,64	4,8	0,5	57	16	2	4	5	3	1064	1,9
5	3	2,66	2,5	0,8	32	14	1	2	3	5	636	1,2
9	4	2,66	5,4	1,7	38	14	1	4	3	4	636	10,7
13-й горизонт												
2	1	2,65	1,8	0,8	59	12	1	9	1	6	634	1,0
11	2	2,66	5,6	0,5	75	28	1	7	1	7	597	1,2
5	3	2,66	4,0	1,8	57	14	1	9	4	8	941	5,5
1	4	2,62	10,2	3,2	55	13	1	1	2	4	1714	2,7
Средние значения по месторождению												
	1	2,65	1,8	0,7	68	14	1	7	4	4	699	1,0
	2	2,65	4,2	0,6	71	22	1	7	3	5	752	1,8
	3	2,66	2,7	1,2	56	14	2	11	4	5	696	4,7
	4	2,66	4,1	1,8	52	13	1	5	3	4	719	5,2

Примечания: 1 — биотитовые разновидности гранитоидов; 2 — высокотемпературные калишпатиты; 3 — слабо проявленные гидрослюдзиты и 4 — интенсивно проявленные гидрослюдзиты; d — минеральная плотность (плотность твердой фазы пород, г/см³); $T_{1/2}$ — период полунасыщения (ч); $P_{эф}$ — эффективная пористость (%); E — модуль Юнга (МПа); mag — магнитная восприимчивость (10⁻⁵ ед. СИ); $\Delta\gamma$ — превышение уровня естественного гамма-излучения (100·МЗв/ч); $\Delta\beta$ — превышение уровня естественного бета-излучения (100·см⁻³·с⁻¹); $\Delta\alpha$ — превышение уровня естественного альфа-излучения (100·см⁻³·с⁻¹); ε — диэлектрическая проницаемость, ρ — удельное электрическое сопротивление (МОм·см); КАП — комплексные аномальные петрофизические коэффициенты.

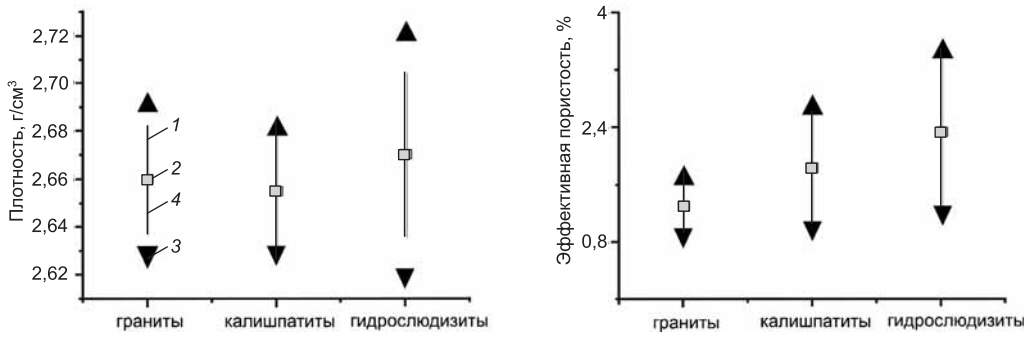


Рис. 8. Диаграммы пористотно-плотностных свойств: 1 — максимальное значение, 2 — среднее значение, 3 — минимальное значение, 4 — стандартное отклонение

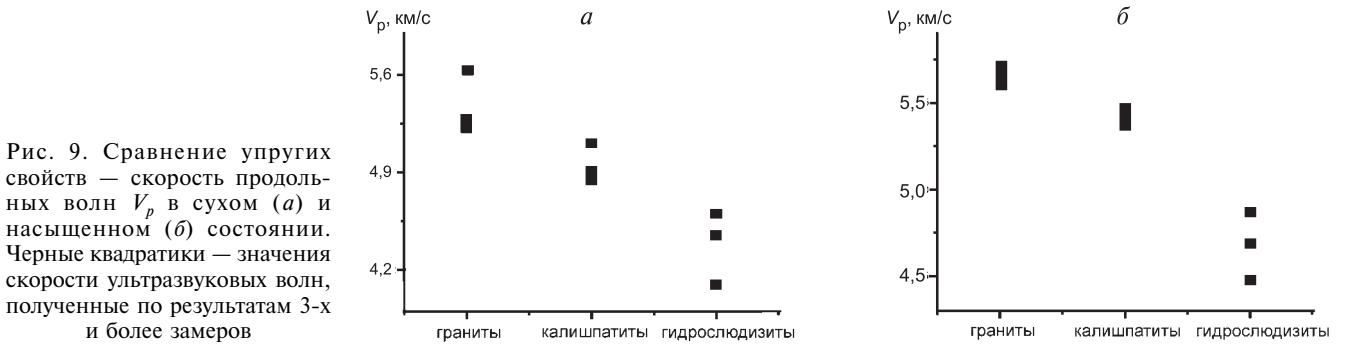


Рис. 9. Сравнение упругих свойств — скорость продольных волн V_p в сухом (а) и насыщенном (б) состоянии. Черные квадратики — значения скорости ультразвуковых волн, полученные по результатам 3-х и более замеров

Проанализируем связь оруденения с параметрами петрофизических аномалий. Как видно из данных табл. 2, площадные промышленные запасы по горизонтам близки между собой. Однако среднее содержание урана снижается с глубиной, а средняя мощность и длина рудных тел возрастают, появляются новые мелкие тела, например, в зоне сближения 13-, 160- и 161-го разломов. Интенсивности аномалий КАПЗ особенно повышены на 9-м и 12-м горизонтах, для которых отмечаются абсолютные максимумы всех параметров аномалий. Площадь аномалий в целом возрастает с глубиной, а их масштаб имеет те же тенденции изменения, что и их интенсивность.

Повышение содержания урана, масштаба и интенсивности петрофизических аномалий на 9-м горизонте могут быть связаны с наличием петрофизического барьера рудоотложения. Он рас-

положен выше по разрезу, где граниты перекрыты вулканитами чехла кальдеры, ограничивающими развитие рудовмещающих 160- и 161-го разломов (рис. 1).

Масштаб аномалий, как и параметры рудных тел, в значительной мере обусловлен различными структурными факторами, которые должны быть изучены в дальнейшем. Следует учитывать и то, что гидрослюдазиты, с которыми они в основном связаны, являются прерудными, а рудосопровождающие альбит-гематитовые изменения проявлены только в зоне локальных аномалий, причем крайне ограниченно.

Заключение. Исследования показали, что изменения изученных петрофизических свойств вмещающих пород закономерно связаны с распространением и интенсивностью развития окolorудных изменений пород и масштабами

Таблица 2

Связь оруденения с параметрами петрофизических аномалий

Номер горизонта (длина рудной зоны, м)	C_{cp}	M_{cp}	Z	КАПЗ	КАП4	$S_{ан3}$	$S_{ан4}$	$M_{ан3}$	$M_{ан4}$	$M_{ан}$
9 (300)	1387-0,0-25,0	3,1-0,0-0,9	1,3	12,4	2,3	50	3,3	620	7,59	628
10 (650)				2,2	1,7	80	3,5	176	5,95	182
11(500)	749-407-260	3,3-1,6-2,7	1,5	2,1	3,3	84	9,3	176	30,7	206
12 (1100)				1,2	10,7	260	120	312	1284	1596
13 (940)	177-101,0-0,0	5,4-3,0-0,0	1,1	5,5	2,7	130	40	715	108	823

Примечания. C_{cp} — среднее содержание урана (первое значение приведено для зон разломов 160 и 161, второе для зоны разлома 13, третье — для остальных зон (у.е.); M_{cp} — средняя мощность рудных тел (первое значение приведено для зон разломов 160 и 161, второе для зоны разлома 13, третье — для остальных зон (м); Z — запасы урана (млн у.е.); КАПЗ — комплексные аномальные петрофизические коэффициенты для слабо проявленных гидрослюдазитов, КАП4 — комплексные аномальные петрофизические коэффициенты для интенсивно проявленных гидрослюдазитов; $S_{ан3}$ — площадь петрофизических аномалий, выявленных в массивах слабо проявленных гидрослюдазитов (m^2); $S_{ан4}$ — площадь петрофизических аномалий, выявленных в массивах интенсивно проявленных гидрослюдазитов (m^2); $M_{ан3}$ — масштаб петрофизических аномалий, выявленных в массивах слабо проявленных гидрослюдазитов; $M_{ан4}$ — масштаб петрофизических аномалий, выявленных в массивах интенсивно проявленных гидрослюдазитов; $M_{ан}$ — общий масштаб петрофизических аномалий.

рудообразующего процесса. На базе усовершенствованной методики исследований удалось выявить рудно-петрофизические аномалии двух масштабных уровней, которые могут служить поисковыми и оценочными критериями оруденения на глубоких горизонтах.

При проведении дальнейших работ для получения статистически более достоверной петрофизической информации прежде всего потребуется более детальное изучение керн скважин. По этим

данным может быть построена трехмерная количественная петрофизическая модель месторождения, включая его отдельные блоки, в которых проводятся поисково-оценочные работы. На основе сравнительного анализа модели с аномалиями, описанными здесь, область проведения более детальных поисков может быть значительно сужена.

При написании статьи авторы постоянно обращались к материалам безвременно ушедшего из жизни Р.М. Насимова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богацкий В.В., Коллеганов Ю.М., Суганов Б.И. Пространственно-статистический анализ геологического строения и размещения полезных ископаемых. М.: Недра, 1976. С. 87.

Бурмистров А.А., Старостин В.И., Дергачев А.Л., Петров В.А. Структурно-петрофизический анализ месторождений полезных ископаемых. М.: МАКС Пресс, 2009. С. 155–161.

Ищукова Л.П. Геология Урулунгуевского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля. М., 1996. С. 154–160.

Лаверов Н.П., Петров В.А., Полуэктов В.В. и др. Урановое месторождение Антей — природный аналог хранилища ОЯТ и подземная геодинамическая лаборатория в гранитах // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50, № 5. С. 387–413.

Минаев В.А., Петров В.А., Полуэктов В.В., Насимов Р.М. Упругие параметры вмещающих пород

месторождения Антей и их связь с условиями рудомещения // Мат-лы 14-й междунар. конф. «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М., 2013. С. 186–189.

Определение петрофизических характеристик по образцам. М.: Недра, 1979. 432 с.

Петров В.А., Полуэктов В.В., Насимов Р.М. и др. Природные и техногенные изменения напряженно-деформированного состояния пород на урановом месторождении в гранитах // Физика Земли. 2009. № 11. С. 86–95.

Петрофизика: Справочник. В 3-х кн. Кн. 1. Горные породы и полезные ископаемые / Под ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1992. 391 с.

Старостин В.И., Дергачев А.Л., Хркович К. Структурно-петрофизический анализ месторождений полезных ископаемых: Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. 288 с.

Поступила в редакцию
01.06.2015