

*В.А. Минаев, И.О. Нафигин, В.А. Петров, В.В. Полуэктов*

## ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТРЕЩИННО-ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА В ГРАНИТОИДНОМ МАССИВЕ МОЛИБДЕН-УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ АНТЕЙ (ЮВ ЗАБАЙКАЛЬЕ)



### Введение

Структурно-петрофизический анализ позволяет в короткие сроки получать статистически достоверную количественную оценку различных видов преобразований пород и руд (тектонические, метасоматические и др.), выделять петрофизические типы сред структурообразования и барьеры рудоотложения, осуществлять прогнозную оценку оруденения различных структурно-морфологических типов пород. Кроме того, результаты петрофизических исследований сейчас приобретают все большее значение, способствуя выработке рациональных направлений поисковых, геологоразведочных и эксплуатационных работ [2].

Получение информации о закономерностях и направлении движения гидротермальных растворов является одной из ключевых задач геологии рудных месторождений, так как решает целый ряд практических вопросов, касающихся всех этапов освоения месторождений и рационального планирования поисково-разведочных работ [1].

В настоящее время не существует утвержденного алгоритма исследований, который бы позволил точно определять пути движения рудоносных растворов и флюидодинамические обстановки рудообразования. В статье авторы подходят к решению этого вопроса посредством изучения анизотропии упругих свойств (скоростей ультразвуковых волн) образцов горных пород методами структурной петрофизики.

Как показали ранее проведенные изыскания, в случае равномерного распределения агрегатов или микротрещин в объеме образца скорости ультразвуковых волн при водонасыщении увеличиваются по всем направлениям и анизотропия упругих свойств не наблюдается. Выраженная увеличением скоростей продольных и поперечных волн в определенном направлении анизотропия является следствием

преимущественной ориентировки минеральных агрегатов, линейностью межзерновых границ и наличием ориентированных систем открытых микротрещин. Все эти факторы могут присутствовать как в комплексе, так и по отдельности и являются результатом воздействия природных или техногенных напряжений, преодолевших прочность породы. В итоге порода подвергается упруго-хрупким или упруго-пластичным деформациям. В отличие от микротрещиноватости, макротрещиноватость в основном имеет тектоническую природу, что доказывается наличием минерализации в большинстве зафиксированных элементов. Лишь малая часть макротрещин может быть предположительно отнесена к техногенным [5].

Помимо этого, перед авторами стояла задача наглядной визуализации строения трещинно-порового пространства массива месторождения Антей, которая была решена путем построения трехмерной модели анизотропии упругих свойств. За последние годы применение трехмерной геоинформационной среды стало обязательной частью работы современного геолога. С помощью данных технологий решается широкий спектр задач, а именно отображение геологических объектов, проведение пространственного, статистического анализа и т.д. В отличие от двухмерного представления, трехмерное дает более объективное представление о пространственном положении исследуемого объекта, его строении, размерах и форме.

### Объект исследований

Работы проводились на молибден-урановом месторождении Антей. Оно расположено в юго-восточном Забайкалье в пределах Стрельцовской кальдеры, сформированной в процессе позднемезозойской тектономагматической активизации региона. Жильно-штокверковое месторождение локализовано

в гранитном фундаменте кальдеры и является наиболее глубоко залегающим объектом Стрельцовского рудного поля [3]. Вмещающие породы представлены в основном биотитовыми и лейкократовыми гранитами, а также высоко- и низкотемпературными метасоматитами в рудоносных зонах, контролируемых системой копланарных разломов. Оработка молибден-урановых руд ведется на месторождении подземным способом. Исследования проводились на горизонтах 9, 10 и 11, которые расположены на глубинах ~550, 610 и 670 м соответственно. На каждом из горизонтов были отобраны коллекции ориентированных в пространстве образцов, представляющих все разновидности вмещающих пород: гранитоидов и их метасоматических преобразований (калишпатизация, гематитизация, гидрослюдизация), широко представленных на месторождении (рис. 1).

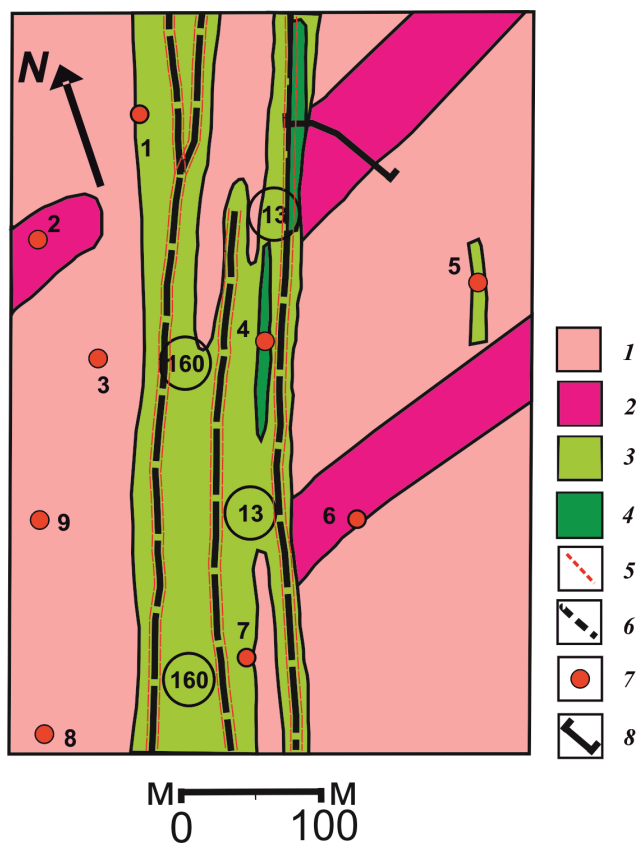


Рис. 1. План горизонта 9 месторождения Антей. Условные обозначения:

1 – биотитовые и лейкократовые разновидности гранитоидов; 2 – высокотемпературные калишпатиты; слабо (3) и интенсивно (4) проявленные гидрослюдизиты; 5 – контур оруденения; 6 – разломы; 7 – точки отбора образцов; 8 – профили отбора образцов. N – направление «на север»

Fig. 1. Plan of horizon 9 of the Antei deposit. Legend: 1 – biotite and leucocratic varieties of granitoids; 2 – high-temperature feldspar granites; weakly (3) and intensively (4) developed hydromicazites; 5 – contour of mineralization; 6 – faults; 7 – sampling points; 8 – sampling profiles. N – the direction «to the North»

### Методические аспекты петрофизических исследований

Проведенные петрофизические исследования включали в себя изучение скоростей продольных ( $V_p$ ) и сдвиговых ( $V_s$ ) волн в сухом и водонасыщенном состоянии пород. Ориентированные образцы 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. Получаемые волновые картины оцифровывались с помощью осциллографа «TiePie 508» (Нидерланды). В качестве контактной смазки применялся гель полисахаридов. Скорости волн измерялись в сухом состоянии, после просушивания при температуре 70°C в течение 4 часов, и в водонасыщенном, после постепенного погружения в воду в течение 7 суток. Практика показывает, 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% [4]. В статье основное внимание будет уделяться скоростям продольных волн.

### Результаты в двумерном представлении

По результатам ультразвукового «просвечивания» образцов построены графики скоростей прохождения волн для трех ортогональных направлений. Кроме того, для каждой из грани кубических образцов были построены эллипсовидные диаграммы распределения ультразвуковых волн, позволяющие наиболее наглядно показать анизотропию скоростей ультразвуковых волн в сухом и водонасыщенном состояниях.

Изучение макротрещиноватости происходило с привлечением фоновых материалов, а именно геологических журналов и планов горизонтов масштаба 1:500 с вынесенными на них данными по макротрещиноватости. По возможности эти данные были заверены натурными наблюдениями морфогенетических параметров непосредственно в горных выработках. Основное внимание уделялось азимутам простирания и углам падения трещин. На основе данной информации были построены стереограммы трещиноватости (равноплощадная проекция на нижнюю полусферу). Для данных целей была использована компьютерная программа Stereo32 (разработка K. Roeller, Ruhr-University Bochum).

Сравнительный анализ материалов показал, что общие ориентировки систем макротрещин в целом совпадают с направлениями максимального

увеличения скоростей ультразвуковых волн, распространяющихся в горизонтальной плоскости (OXY) образцов пород после их насыщения водой (рис. 2). На рисунке представлены лишь примеры двух образцов, отобранных на различных горизонтах месторождения, в то время как подобные результаты были получены для всей коллекции каменного материала. Эта закономерность подтверждает тектоническое происхождение макро- и микротрещин на месторождении.

Такая ситуация натолкнула авторов на предположение о сохранении общей директивности систем трещинно-поровых каналов со времени рудолокализации. На месторождении Антей зафиксированы случаи нахождения обогащенных рудных столбов в местах пересечения субширотных тел альбититов и калишпатитов с рудоподводящими разломами № 13 и 160, имеющими север-северо-восточное простирание (см. рис. 1) [6]. В период рудообразования системы микротрещин, подобные тем, что определяются путем ультразвуковых исследований, могли

составлять сети взаимосвязанных трещинно-поровых каналов, которые служили путями для направленных потоков флюидных растворов. Для подтверждения данной гипотезы необходимо составить максимально информативное пространственное представление о характере анизотропии скоростей ультразвуковых волн в массиве месторождения Антей.

В этих целях, а также для дальнейшей интеграции данной информации в ГИС-проект Стрельцовского рудного поля была построена трехмерная модель анизотропии упругих свойств в массиве месторождения Антей.

### Методические аспекты построения трехмерного ГИС-проекта

Выбор используемого программного обеспечения обусловлен целями, стоящими перед специалистом. К сожалению, на данный момент не существует полноценной трехмерной геоинформационной системы, которая позволяла бы за счет многообразия функций систем автоматизированного

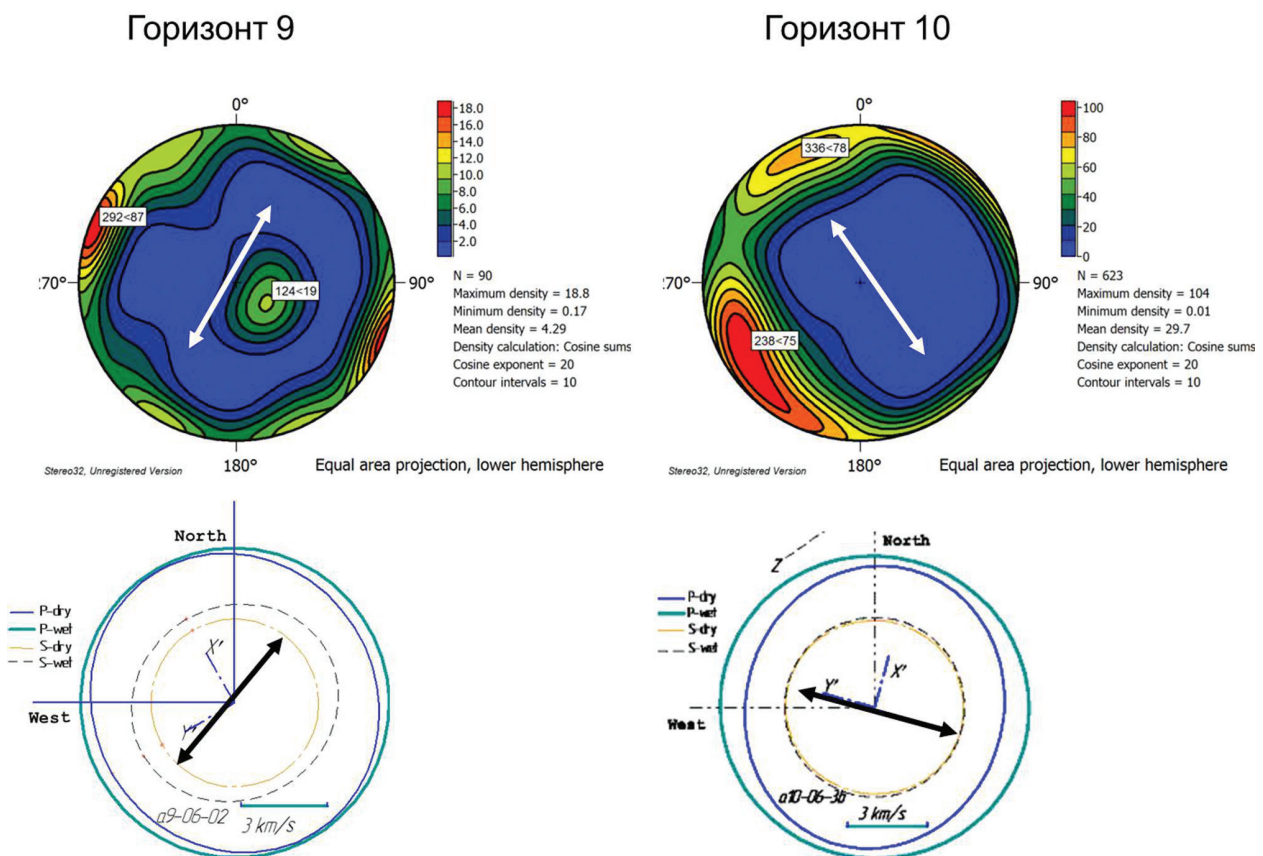


Рис. 2. Сравнение ориентировок систем макротрещин и направлений увеличения скоростей ультразвуковых волн после насыщения на 9-м и 10-м горизонтах месторождения Антей. Цветная шкала показывает количество макротрещин; P(S)dry(wet) – скорости P(S-волн) в сухом (водонасыщенном) состоянии; North – направление на Север; West – направление на Запад

Fig. 2. Comparison of the orientations of macrocrack systems and directions of increasing the velocities of ultrasonic waves after saturation at the horizons 9 and 10 of the Antei deposit. The color scale shows the number of macrocracks; P(S) dry (wet) – speed P(S-waves) in a dry (water-saturated) state



проектирования (САПР) и геоинформационных систем (ГИС) разрабатывать методики для решения любых математических и геометрических задач. По этой причине для решения промежуточных задач специалистам приходится подбирать комплексы из тех или иных программных обеспечений (ПО). В связи с этим может возникнуть проблема, связанная с несогласованностью типов данных или их представлений между выбранными ПО, которая зачастую приводит к нарушению топологии векторных данных, или проблема, связанная с отсутствием импортируемого формата данных. Поэтому подбору ПО нужно уделить пристальное внимание. Такие проблемы зачастую связаны с задачей, требующей создания трехмерной структурной модели массива горных пород для дальнейшего импорта в систему инженерного анализа (CAE). Даже в том случае, когда обе программы поддерживают обусловленный формат данных, форма их представления может отличаться.

Одним из вариантов решения данной проблемы является использование семейства программных обеспечений конкретного разработчика. К примеру, если остановиться на семействе ПО фирмы *AutoDesk*, то для построения детальной трехмерной модели можно использовать пакет *CAD Inventor*, а для инженерного анализа CAE *NASTRAN*. Если обратить внимание на комплекс ПО фирмы *Dassault Systemes*, то для создания модели будет очевидным выбор *CAD SolidWorks*, а для инженерного анализа *CAE Abaqus*. Также следует отметить, что не всегда приходится прибегать к использованию стороннего ПО, ведь функционала выбранной программы зачастую бывает достаточно. Затронутые проблемы играют важную роль при создании методики и ее реализации в программном комплексе. Для достижения задачи, поставленной в данной работе, опираясь на вышеизложенные проблемы и требуемый функционал, было принято решение использовать единую трехмерную графическую среду.

Необходимо отметить, что предложенный ниже алгоритм создания трехмерной модели графика нельзя рассматривать как единственный методический подход. Он основывается исключительно на опыте авторов в работе с программными продуктами ГИС и САПР, их функциональными инструментами, и может быть в корне изменен в зависимости от выбора или предпочтения пользователя. В используемом авторами программном продукте некоторые части алгоритма предложенной ниже методики могут быть решены иными способами.

Методику создания диаграммы можно условно разделить на несколько этапов.

На *первом этапе* исследования требовалось поместить в трехмерную графическую среду

эллипсоидные диаграммы разности скоростей прохождения продольных ультразвуковых волн в сухом и водонасыщенном состоянии образцов горной породы (см. рис. 2). Напомним, что диаграммы строились на основе пространственно-ориентированных образцов, отобранных с 9, 10 и 11-го горизонтов месторождения. Диаграмма каждого образца представляла собой растровое изображение с тремя графиками, каждый из которых соответствовал одной из пространственных плоскостей:  $XY$ ,  $XZ$ ,  $YZ$ , где  $X$  соответствовал направлению на географический северный полюс,  $Y$  – на запад, а  $Z$  – к центру масс Земли. Далее требовалось разделить каждый растровый снимок на три изображения с графиками. При этом все полученные изображения должны были иметь одинаковое разрешение и общую начальную точку оси координат. Для решения этой задачи была написана программа в среде *MATLAB* с использованием набора инструментов для обработки изображений *Image Processing*. Данная программа позволила полностью автоматизировать процесс получения изображений с графиками по каждой диаграмме. В общей сложности количество созданных изображений составило 216 единиц.

*Второй этап* заключался в интегрировании полученного растрового графика в трехмерную геоинформационную среду. Для этого в трехмерной ГИС было создано три рабочих плоскости соответствующих ранее указанным пространственным направлениям и в каждую из них было помещено и переориентировано соответствующее растровое изображение. Далее, центр каждого изображения был позиционирован по геодезическим координатам отобранного образца. В качестве картографической проекции в ГИС-проекте была использована прямоугольная система координат *UTM* на основе датума *WGS 84*.

На *третьем этапе* был оцифрован каждый график. В случае, когда график был представлен парой эллипсов, на нем отчетливо прослеживалось их расхождение по длинам больших полуосей. Этот участок соответствует наибольшему расхождению между скоростями ультразвуковых волн. В случае, когда график был представлен окружностями с разными диаметрами, то он рассматривался как изотропное тело, соответствующее либо растяжению, либо сжатию по всем направлениям, в зависимости от поведения графиков по другим плоскостям. Ситуация, когда графики были отражены таким образом на всех плоскостях, говорит о том, что в месте отбора образца нельзя вычленить единственную ведущую трещинно-поровую систему, но существует густая сеть разнонаправленных трещин и поровых каналов.

*Четвертый этап* заключался в заполнении замкнутого пространства построенного графика

(эллипса или окружности) плоским твердым телом (плоскостью) с последующим добавлением к нему ребер, разграничивающих зоны повышения скоростей ультразвуковых волн после водонасыщения. Ребра создавались на основе разделения твердого тела двумя плоскостями, перпендикулярными к плоскости графика, а вектор их направления определялся центром графика и точкой пересечения между двумя эллипсами. В конечном итоге было получено плоское твердое тело, состоящее из четырех секторов, два из которых были окрашены в белый цвет, а два других, отвечающих за направления максимального увеличения скоростей ультразвуковых волн после водонасыщения, в черный цвет. В случае когда график был представлен окружностями, ребра не добавлялись, а тело оставалось полностью окрашено в белый или черный цвет.

### Результаты в трехмерном представлении

Повторяя цикл со второго этапа, было создано 216 диаграмм. Каждая из них была сохранена в отдельный файл и помещена в основной геоинформационный проект (рис. 3).

Так как в данном случае нас интересуют тела калишпатитов и диаграммы анизотропии ультразвуковых волн, лишние слои были отключены, а прозрачность модели повышена до 90% (рис. 4).

Для визуальной наглядности и максимальной информативности диаграмм к ним был подобран и установлен общий коэффициент масштабирования.

С целью повышения удобства доступа к данным по каждому из горизонтов они были систематизированы и сгруппированы по тематическим слоям. Такой подход к визуализации информации позволяет исследователю более корректно ее анализировать, делать выводы и принимать выверенные решения.

Рисунки 3 и 4 приведены в большей степени с целью общего знакомства со структурой проекта. Напомним, одной из целей построения данного ГИС-проекта является проверка гипотезы о возможной директивности скоростей ультразвуковых волн для образцов, отобранных из жилообразных тел калишпатитов. Для этого рассмотрим каждый из горизонтов подробнее.

На горизонте 9 (рис. 5) явно выделяется две группы диаграмм: для образцов № 1-6 наблюдается северо-западная ориентировка черных секторов, которые отвечают максимальному повышению скоростей продольных ультразвуковых волн после водонасыщения, а для образцов № 7, 8 данные сектора обращены на северо-восток.

Исходя из данного плана (плоскость XY), образцы, которым присуща северо-западная ориентировка максимального увеличения скоростей ультразвуковых волн после водонасыщения, локализованы в телах калишпатитов. Для заверки данного факта рассмотрим модель под другим ракурсом (рис. 6). На разрезе по плоскости, близкой к XZ, отчетливо видно, что именно образцы № 7 и 8 не попадают в зону влияния калишпатитов.

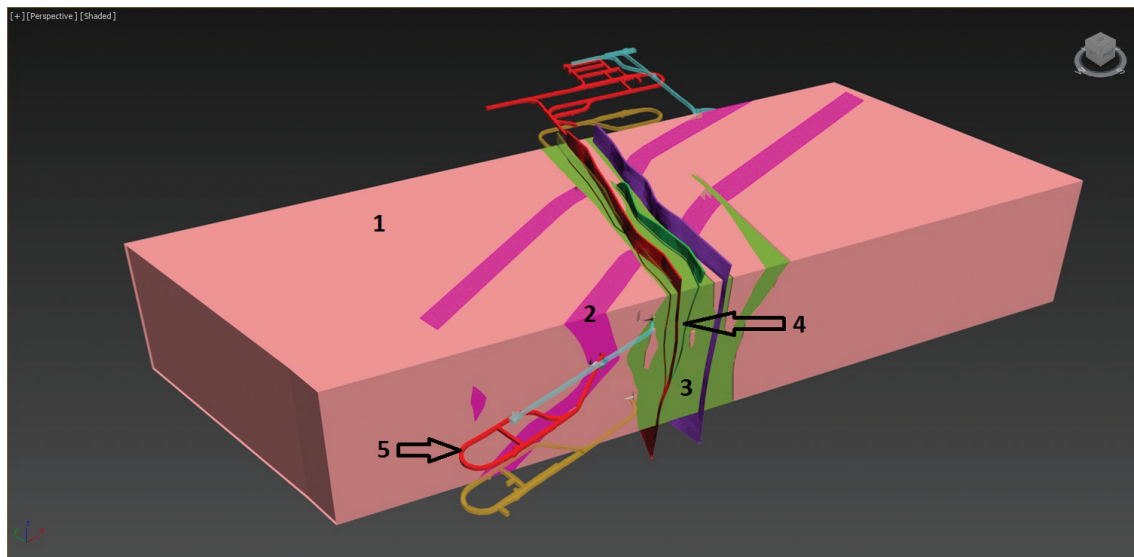


Рис. 3. Основной ГИС-проект массива пород месторождения Антей (все слои включены, прозрачность 0%).

Условные обозначения:

- 1 – биотитовые и лейкократовые разновидности гранитоидов; 2 – высокотемпературные калишпатиты;  
3 – гидрослюдазиты; 4 – разломы; 5 – горные выработки

*Fig. 3. The main GIS project of the Antei deposit rock massif (all layers are on, the transparency is 0%).  
Legend: 1 – biotite and leucocratic varieties of granitoids; 2 – high-temperature feldspar granites;  
3 – hydromica granites; 4 – faults; 5 – mining sites*

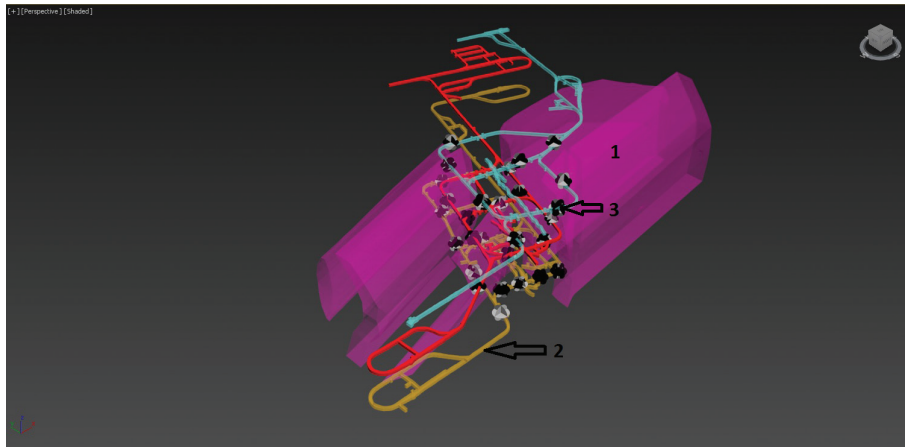


Рис. 4. Основной ГИС-проект массива месторождения Антей. Включены слои: 1 – высокотемпературные калишпатиты; 2 – горные выработки; 3 – диаграммы анизотропии скоростей ультразвуковых волн

*Fig. 4. The main GIS project of the Antei deposit rock massif. Layers on: 1 – high-temperature feldspar granites; 2 – mining sites; 3 – diagrams of the anisotropy of the velocities of ultrasonic waves*

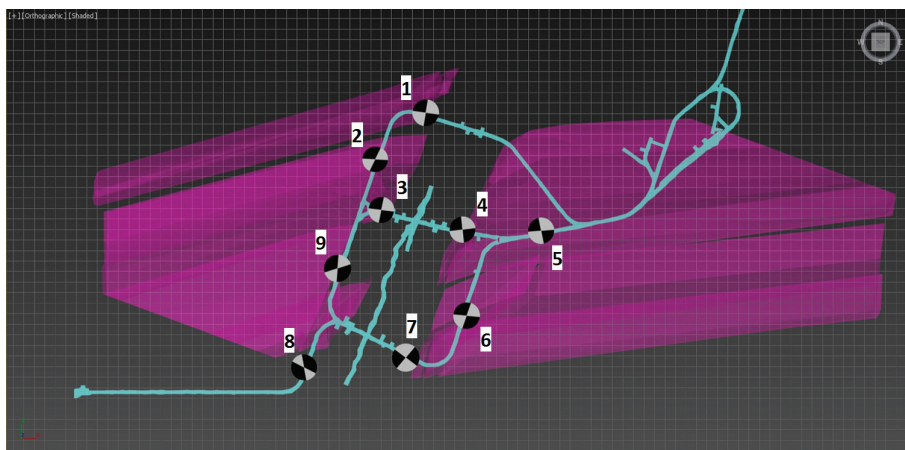


Рис. 5. Модель анизотропии скоростей ультразвуковых волн на горизонте 9 месторождения Антей в плоскости XY. 1-9 – номера образцов

*Fig. 5. Model of the anisotropy of ultrasonic waves velocities at horizon 9 of the Antei deposit in the XY plane. 1-9 – sample numbers*

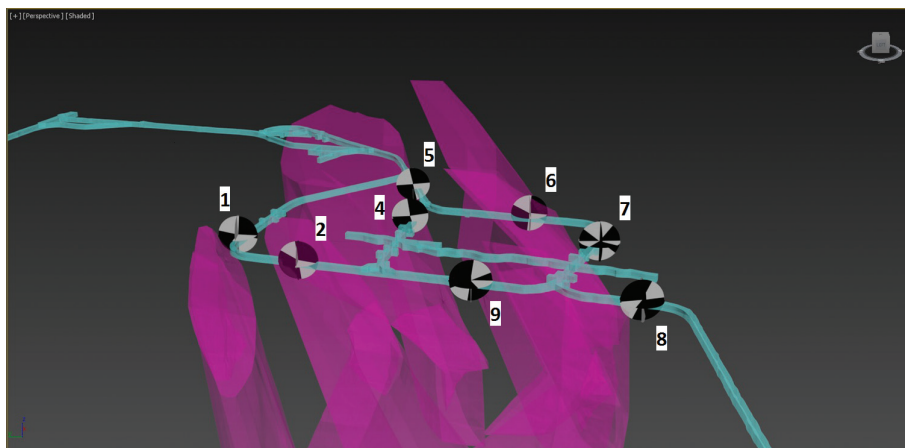


Рис. 6. Модель анизотропии скоростей ультразвуковых волн на горизонте 9 месторождения Антей в плоскости, близкой к XZ. 1-9 – номера образцов

*Fig. 6. Model of the anisotropy of ultrasonic waves velocities at horizon 9 of the Antei deposit in the plane close to XZ. 1-9 – sample numbers*



На модели горизонта 10 месторождения Антей фиксируется большое количество образцов (образцы № 1, 4, 8-10), для которых не выявлено единственное главное направление максимального увеличения скоростей ультразвуковых волн после водонасыщения (рис. 7). Это свидетельствует о наличии сразу нескольких разнонаправленных систем трещин и поровых каналов в данных локациях.

Можно предположить, что данная ситуация является следствием изменения общего режима сжатия на режим растяжения, а также переориентировки главных осей напряжений на гипсометрических уровнях 10-12 горизонтов месторождения Антей [5]. Наряду с этим, как и на горизонте 9, выделяется две группы диаграмм: для образцов № 3, 5-7 наблюдается северо-западная ориентировка черных секторов, которые отвечают максимальному повышению

скоростей продольных ультразвуковых волн после водонасыщения, а для образца № 2 данные сектора обращены на северо-восток.

Аналогично случаю, наблюдаемому на горизонте 9, образцы, которым присуща северо-западная ориентировка максимального увеличения скоростей ультразвуковых волн после водонасыщения, локализованы в телах калишпатитов. На разрезе по плоскости, близкой к  $XZ$ , демонстрируемом в целях объективной оценки анизотропии скоростей ультразвуковых волн, отчетливо видно, что образец № 2 не попадает в зону влияния калишпатитов (рис. 8).

В ситуации с горизонтом 11, по аналогии с вышележащими горизонтами, можно предположить, что диаграммы с северо-западной ориентировкой черных секторов (образцы № 3-5, 11) принадлежат телам высокотемпературных калишпатитов (рис. 9).

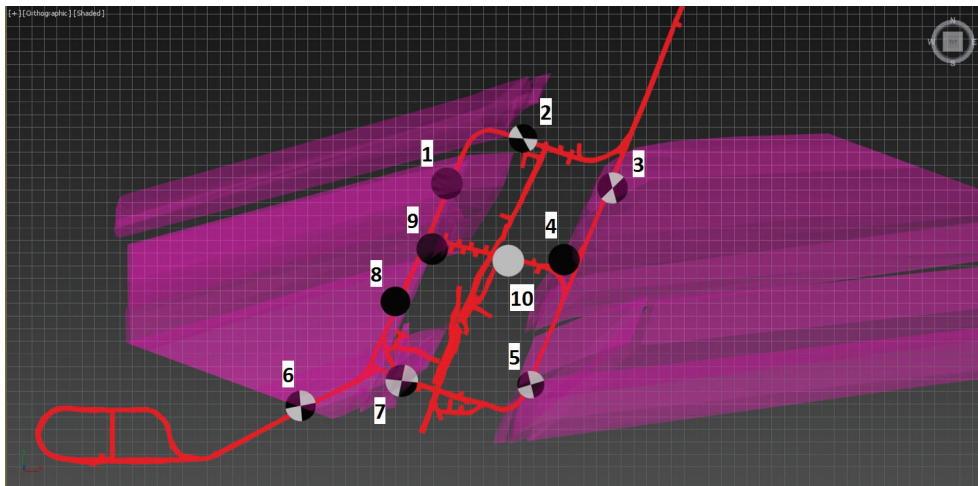


Рис. 7. Модель анизотропии скоростей ультразвуковых волн на горизонте 10 месторождения Антей в плоскости  $XY$ . 1-10 – номера образцов

*Fig. 7. Model of the anisotropy of ultrasonic waves velocities at horizon 10 of the Antei deposit in the  $XY$  plane. 1-10 – sample numbers*

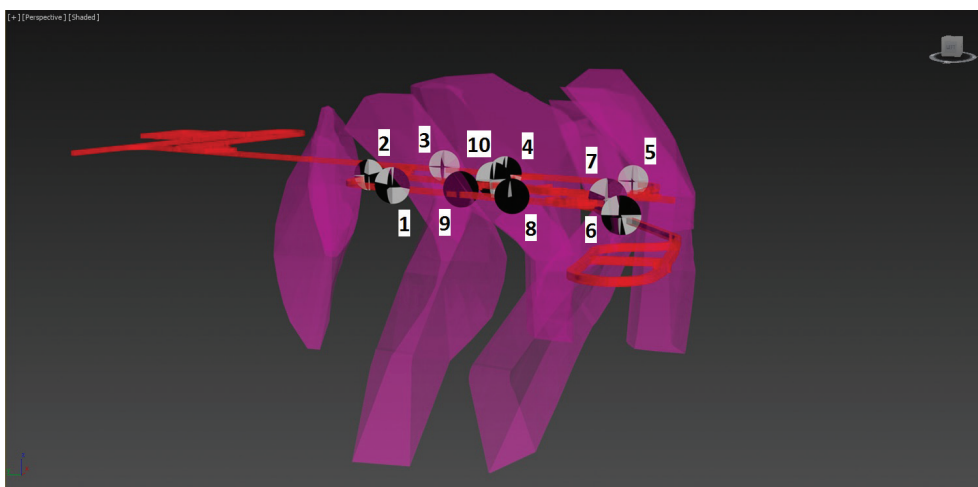


Рис. 8. Модель анизотропии скоростей ультразвуковых волн на горизонте 10 месторождения Антей в плоскости, близкой к  $XZ$ . 1-10 – номера образцов

*Fig. 8. Model of the anisotropy of ultrasonic waves velocities at horizon 10 of the Antei deposit in the plane close to  $XZ$ . 1-10 – sample numbers*

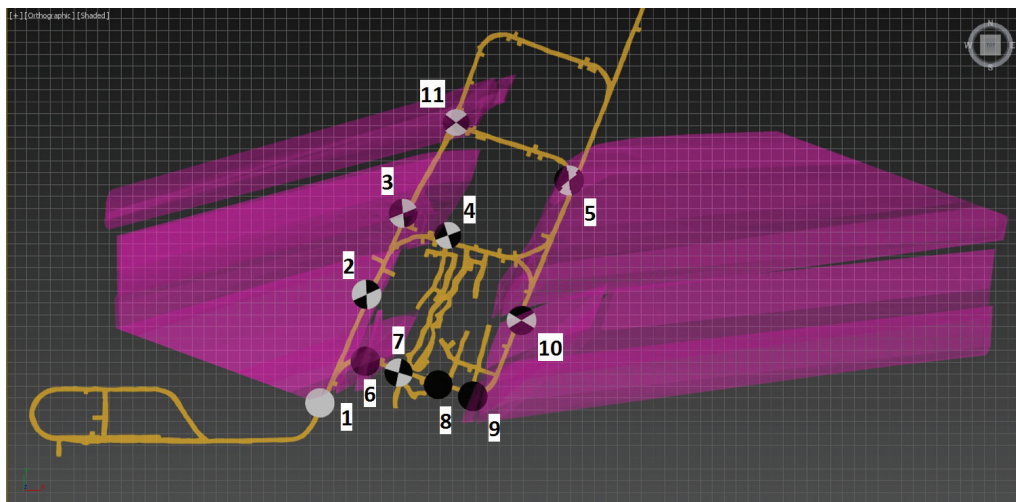


Рис. 9. Модель анизотропии скоростей ультразвуковых волн на горизонте 11 месторождения Антей в плоскости XY. 1-11 – номера образцов

Fig. 9. Model of the anisotropy of ultrasonic waves velocities at horizon 11 of the Antei deposit in the XY plane. 1-11 – sample numbers

Однако план горизонта в плоскости XY (рис. 9) не дает отчетливого представления о положении отобранных образцов в пространстве.

Например, при взгляде на план можно ошибочно отнести образец №2 к калишпатитам, в то время как ориентировка секторов, отвечающих максимальному повышению скоростей ультразвуковых волн, говорит об обратном.

Для повышения наглядности необходимо рассмотреть картину под другим углом обзора. На рисунке 10, отображающем модель горизонта 11 в плоскости, близкой к XZ, видно, что образцы №2 и 10 не локализованы в телах калишпатитов.

Таким образом, на всех горизонтах наблюдается отчетливая директивность скоростей ультразвуковых волн, а именно, общее северо-западное направление максимального повышения скоростей ультразвуковых волн после водонасыщения для образцов, локализованных в телах высокотемпературных калишпатитов и северо-восточное для остальных вмещающих пород.

### Заключение

Исходя из результатов структурно-петрофизических исследований и их воспроизведении в трехмерных моделях гранитоидного массива и горизонтах отработки месторождения Антей, можно сделать следующие выводы:

1. Общие ориентировки систем макротрещин в целом совпадают с направлениями максимального увеличения скоростей ультразвуковых волн в ориентированных образцах пород после их насыщения водой, что подтверждает тектоническое происхождение макро- и микротрещин на месторождении.

2. В период рудообразования системы микротрещин, подобные тем, что определяются путем ультразвуковых исследований, могли составлять сети взаимосвязанных трещинно-поровых каналов, которые служили путями для направленных флюидопотоков.

3. Построение трехмерной модели анизотропии распространения ультразвуковых волн дало возможность подтвердить теорию о том, что нахождение обогащенных рудных столбов в местах пересечения субширотных тел калишпатитов с рудоподводящими разломами №13 и 160, имеющими север-северо-восточное простирание, может быть связано с существованием на месторождении Антей двух систем трещинно-поровых каналов, а именно северо-западной, наблюдаемой в телах высокотемпературных калишпатитов и северо-восточной, присущей остальным породам и определяемой влиянием рудоподводящих разломов.

4. Использование трехмерного ГИС-проекта позволяет составить наиболее полную и объективную картину особенностей строения геологических объектов, что и обуславливает стремительное развитие и растущую актуальность такого направления геологии, как геоинформатика.

Работа выполнена в рамках темы 0136-2018-0016 государственного задания ИГЕМ РАН «Развитие интегрированной информационной системы для пространственно-временного моделирования рудообразующих систем месторождений стратегических металлов на основе ГИС технологий».

**Ключевые слова:** гранитоиды, уран-молибденовое месторождение, петрофизические параметры, ультразвук, трещинно-поровое пространство,



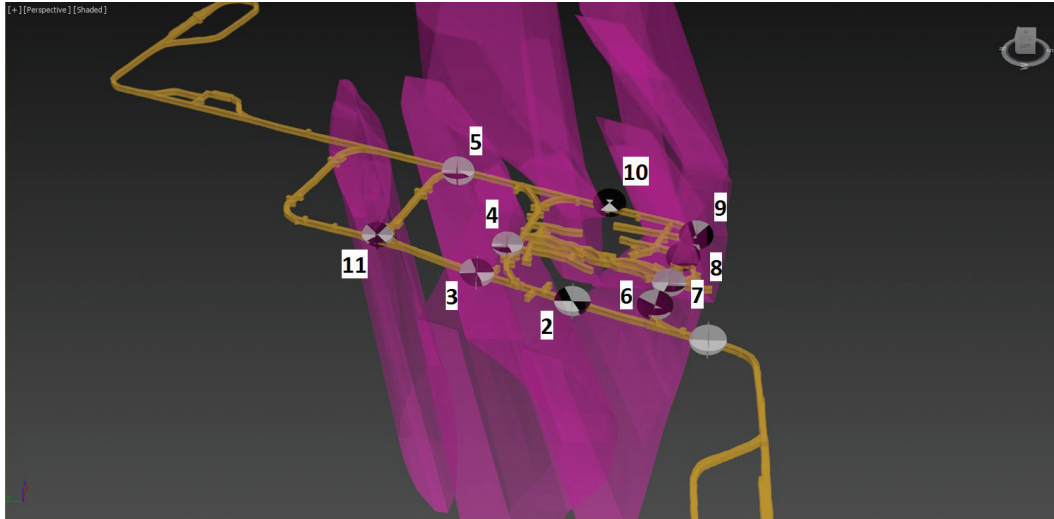


Рис. 10. Модель анизотропии скоростей ультразвуковых волн на горизонте 11 месторождения Антей в плоскости, близкой к XZ. 1-11 – номера образцов

*Fig. 10. Model of the anisotropy of ultrasonic waves velocities at horizon 11 of the Antei deposit in the plane close to XZ. 1-11 – sample numbers*

фильтрационные характеристики, ГИС-проект, трехмерная модель.

микроструктурного анализа // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 12. – С. 17-23.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бетехтин А.Г., Вольфсон Ф.И., Заварицкий А.Н., Коржинский Д.С., Левицкий О.Д., Николаев В.А. Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. – М. : Изд-во АН СССР, 1953. – 615 с.
2. 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.
3. Ищукова Л.П., Модников И.С., Сычев И.В. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. – Иркутск : Типография «Глазовская», 2007. – 260 с.
4. Минаев В.А., Петров В.А., Полуэктов В.В. Напряженно-деформированное состояние и вариации значений упругих параметров вмещающих гранитоидов молибден-уранового месторождения Антей (Восточное Забайкалье) на разных глубинах // Геофизические исследования. – 2016. – Т. 17, № 2. – С. 19-31.
5. Минаев В.А. Структурно-петрофизические условия локализации урановых руд в фундаменте Стрельцовской кальдеры (на примере месторождения Антей) : дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.11. – М. : ИГЕМ РАН, 2016. – 135 с.
6. Петров В.А., Минаев В.А., Устинов С.А., Полуэктов В.В., Андреева О.В. Оценка путей и флюидодинамических условий миграции рудоносных растворов методами структурной петрофизики и

#### REFERENCES

1. Betekhtin A.G., Volfson F.I., Zavaritsky A.N., Korzhinsky D.S., Levitsky O.D., Nikolaev V.A. The main problems in the study of magmatic ore deposits. Moscow : Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1953. 615 p.
2. Burmistrov A.A., Starostin V.I., Dergachev A.L., Petrov V.A. Structural-petrophysical analysis of mineral deposits. Moscow : MAKS Press, 2009. 408 p.
3. Ishukova L.P., Modnikov I.S., Sychev I.V. Uranium deposits of the Streltsovskoe ore field in Transbaikalia. Irkutsk : Printing house Glazovskaya, 2007. 260 p.
4. Minaev V.A., Petrov V.A., Poluektov V.V. Stress-strain state and variations in the elastic parameters of the host granitoids of the molybdenum-uranium Antei deposit (Eastern Transbaikalia) at different depths // Geophysical Investigations. 2016. V. 17., No. 2. P. 19-31.
5. Minaev V.A. Structural-petrophysical conditions of localization of uranium ores in the basement of the Streltsov caldera (on the example of the Antei deposit) : Thesis for a scientific degree of the candidate of geological and mineralogical sciences (PhD degree). Moscow : IGEM RAS, 2016. 135 p.
6. Petrov V.A., Minaev V.A., Ustinov S.A., Poluektov V.V., Andreeva O.V. Evaluation of the ways and fluid-dynamic conditions for the migration of ore-bearing solutions by the methods of structural petrophysics and microstructural analysis // Exploration and conservation of mineral resources. 2017. No. 12. P. 17-23.