DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-76-86 УДК 621.039

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В СУЩЕСТВУЮЩИХ СКВАЖИНАХ НА УЧАСТКЕ НЕДР «ЕНИСЕЙСКИЙ», В Т. Ч. ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ СИСТЕМ ТРЕЩИН И АНИЗОТРОПИИ МАССИВА ПОРОД

В. С. Гупало[1], К. С. Казаков[1], В. А. Минаев[2], Д. А. Озерский[1], С. А. Устинов[2], И. О. Нафигин[2]

[1] Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

[2] Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2021 г.

Условия в кристаллической геологической среде, определяющие долговременную безопасность захоронения РАО редуцируются до двух принципиальных факторов – особенностей вмещающих пород и трещинной сети, свойственной изучаемому участку горного массива. Уточнение параметров, выявленных на ранних стадиях геологического изучения, трещин является одной из наиболее приоритетных задач при проведении оценок безопасности размещения РАО в горных породах. Данные параметры также должны учитываться при формировании требований к составу и структуре системы инженерных барьеров, препятствующих выходу радионуклидов за пределы захоронения. Представленный материал содержит описание работ и примененных подходов при обработке результатов обследований скважин поисковой и оценочной стадий геологического изучения участка Енисейский, выполненных с применением специализированного видео каротажного оборудования.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, захоронение радиоактивных отходов, подземная исследовательская лаборатория, характеризация массива, исследования прискважинной зоны, видеообследование скважин, определение основных систем трещин.*

Результаты выполненных работ по геологическому изучению участка «Енисейский» [1, 2] указывают на наличие различного рода тектонических нарушений в пределах блока, предлагаемого для строительства ПИЛ. При этом, основой информации о нарушенности массива на целевом интервале глубин являются результаты документации керна скважин, пробуренных на участке, а также данные скважинных геофизических исследований [3]. Данная информация дает представление о количественных характеристиках нарушений в массиве горных пород. Однако, в связи с тем, что бурение разведочных скважин производилось без ориентирования керна в пространстве, остаются нерешёнными вопросы о действительном пространственном положении тектонических нарушений и систем трещиноватости [4]. Еще одним фактором, осложняющим описание структурных особенностей керна, является то, что в процессе его извлечения образуются техногенные сколы и трещины, которые вносят дополнительные неопределенности при оценке фактического состояния массива. В связи с этим, было принято решение об исследованиях стволов скважин с использованием специально разработанного скважинного оборудования — исследовательского зонда, позволяющего определить ориентировку систем

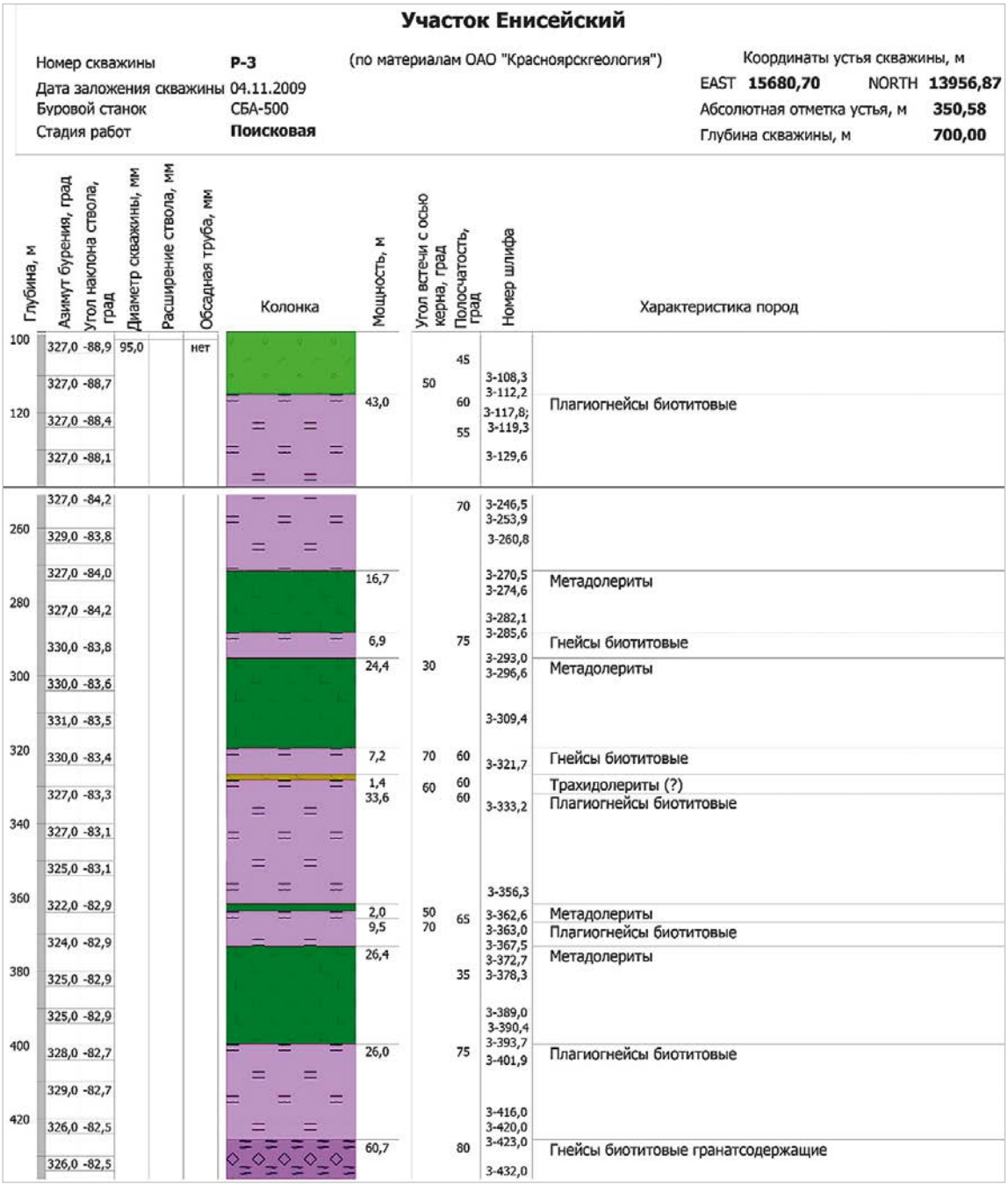

Рис. 1. Пример геологической колонки (Элемент колонки скважины Р-3) [2]

трещин, параметры трещинной сети и зафиксировать мощность структурных нарушений.

Исходными данными для планирования интервалов обследований в скважинах являлись первичные геологические материалы, полученные по результатам геологоразведочных работ (ГРР) поисковой (2003—2010 гг.) и оценочной (2010—2014 гг.) стадий [3, 5, 6] . В пройденных скважинах выполнена геологическая документация керна, проведены опытно-фильтрационные работы, площадные и скважинные геофизические исследования, составлены геологические колонки в масштабе 1:500 (рис. 1) [2]. На момент проведения обследований верхняя часть всех скважин до разных глубин обсажена трубами с диаметрами 127—219 мм.

Материалы предшествующих стадий геологического изучения участка «Енисейский» были использованы для построения его трехмерной геологической модели, разработанной в программной среде ГГИС «Micromine» в которой на основе имеющихся представлений о геологическом строении массива спрогнозированы участки расположения наиболее крупных разрывных нарушений, принципиальных с точки зрения обеспечения долговременной безопасности.

Выполненные объемы полевых работ на участке «Енисейский» в 2020 году

Всего в ходе работ, выполненных в период полевого сезона 2020 года на участке «Енисейский» было обследовано 7 скважин (Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, Р-8, 1-Е, ПР-1). Расположение обследованных скважин относительно границ лицензионного участка (в соответствии с лицензией № КРР 16117 ЗД), приведена на рис. 2.

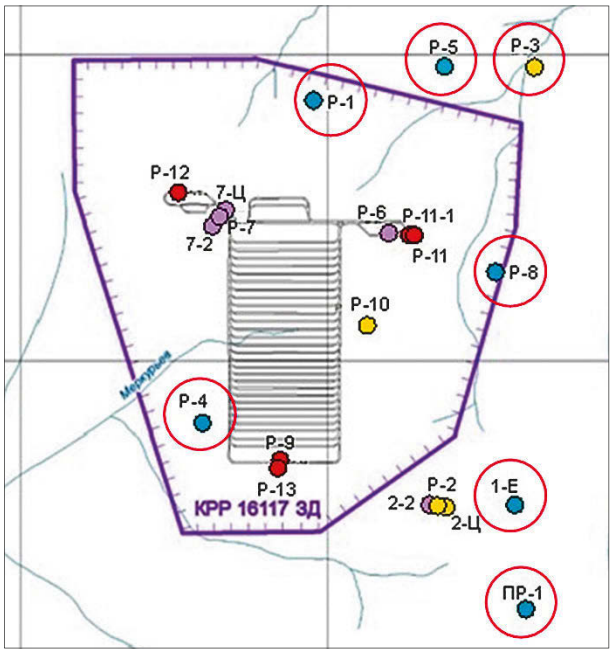

Рис. 2. Расположение обследованных скважин относительно границ лицензионного участка недр «Енисейский» и площадки строительства ПИЛ [10, 7]

Краткое описание выполненных работ по обследованию скважин Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, Р-8, 1-Е, ПР-1 представлено в табл.1.

Таблица 1. Итоги работ по обследованию прискважинной зоны

Общий метраж обследований (с учетом обсадных колонн)	3 265,70	пог. м
Общий метраж обследованных участков открытых стволов	1 719,40	пог. м
Выделено интервалов для первоочередного детального изучения	275	шт.
Всего выделено интервалов для изучения	1 309	шт.
Всего обследовано скважин	7	шт.

Для подготовки планов обследований на каждую из скважин был составлен сводный перечень интервалов, в который были включены данные о глубинах расположения контактов пород, их литологических разностей, зонах дизъюнктивных нарушений, участков с повышенной водоотдачей/значениями коэффициента фильтрации и трещиноватости — сформированных из данных предшествующих стадий геологического изучения и модельных прогнозов. Также в ходе обследований планируемый перечень интервалов дополнялся в оперативном режиме при просмотре информации, получаемых с камер исследовательского зонда. Например, особый интерес вызывали участки со следами вывалов горных пород, каверн, участки с залеченными и открытыми трещинами. Данные участки добавлялись в перечень итоговых материалов скважинных обследований. Применение данных методов позволило с точностью до нескольких сантиметров установить положение геологических границ, тектонических зон, получить информацию о местоположении, размерах, ориентировки трещин и пустот, положении грунтовых вод, а также определить углы падения трещин.

Описания процесса проведения исследований и задействованного оборудования

Для обследований скважин был разработан многофункциональный скважинный исследовательский зонд, предназначенный для визуального изучения строения стенок скважин вертикального или горизонтального заложения диаметром от 56 мм и выше, на глубинах до 700 м, не заполненных водой или заполненных оптически прозрачной жидкостью. Зонд оборудован двумя видеокамерами, предназначенными для визуального контроля процесса погружения, выявления интересующих интервалов и формирования первичной информации для последующей камеральной обработки (рис. 3).

Фронтальная камера предназначена для получения первичной информации о местоположении исследовательского зонда по отношению к элементам геологического строения и выявления особенностей участков массива. С помощью боковой камеры проводилось детальное изучение особенностей геологического разреза. Для этого боковая камера смонтирована на вращающейся оси, обеспечивающей получение изображения по всей окружности поверхности скважины. Исследовательский зонд оснащен блоками «координатной привязки» и «ориентировки», делающими возможным установление положения зон нарушений в массиве. Для получения качественного изображения все камеры оборудованы маломощными диодными светильниками, имеющими спектр света близкий к дневному. Видеосигнал и данные о положении зонда относительно сторон света,

Рис. 3. Обследования прискважинных зон на участке «Енисейский»

глубины погружения зонда, температуры среды (°С) выводится на экран компьютера и отражаются на первичных файлах обследования, значение азимута совпадает с осью изображения боковой камеры (рис. 4). Процесс создания первичных файлов осуществляется в автоматическом режиме.

В процессе обследований проводился визуальный осмотр записей с первичным описанием выявляемых структурных нарушений — трещин, каверн и т.д. Выявленные нарушения увязывались с данными геологических колонок и трехмерной геологической моделью, также их

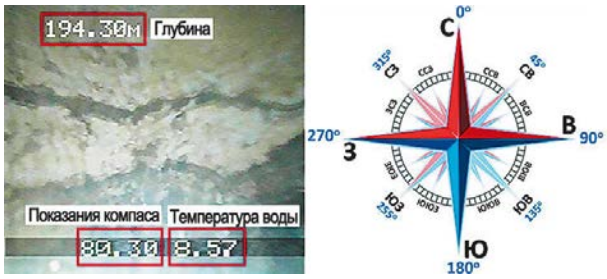

Рис. 4. Показания боковой камеры в процессе обследования (пример отображения измеряемых величин и соответствие показаний электронного компаса сторонам света)

первичное описание заносилось в базу данных по каждому из интервалов глубин, выбранных на стадии подготовки. Существенное влияние на формирование первичных данных видеообследования оказали факторы, снижающие обзорность в водной среде (стволы скважин были заполнены водой) — наличие взвесей в стволе скважины. Особую опасность при проведении видеообследования представляли участки с повышенным коэффициентом трещиноватости, склонные к вывалообразованию, а также участки с шероховатыми стенками ствола (рис. 5). Собранные по итогам полевых обследований данные были переданы для детального изучения и подготовки соответствующих описаний в ходе камеральных работ.

В ходе камеральной обработки первичной документации обследования прискважинных зон осуществлялось выделение линейных структур (трещин) из цифровых изображений, полученных в ходе обследования прискважинной зоны. Также были получены пространственные характеристики наиболее крупных систем и одиночных трещин: угол падения, угол простирания, мощность. Использованные при обработке первичных данных методики и подходы опираются на международный научный опыт в области

Рис. 5. Участки стволов скважин, проходящие через породы, склонные к вывалообразованию, и зоны повышенной трещиноватости массива

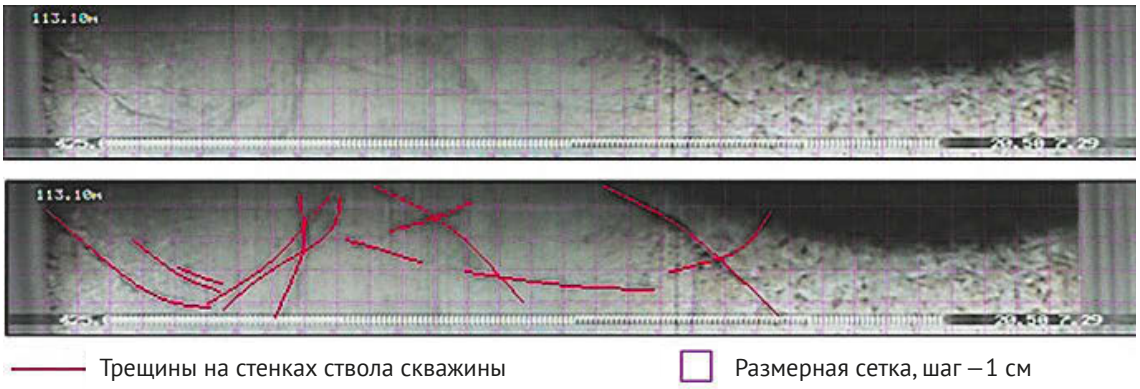

Рис. 6. Панорамный снимок ствола скважины на глубине 113,1 м с нанесенной регулярной сеткой

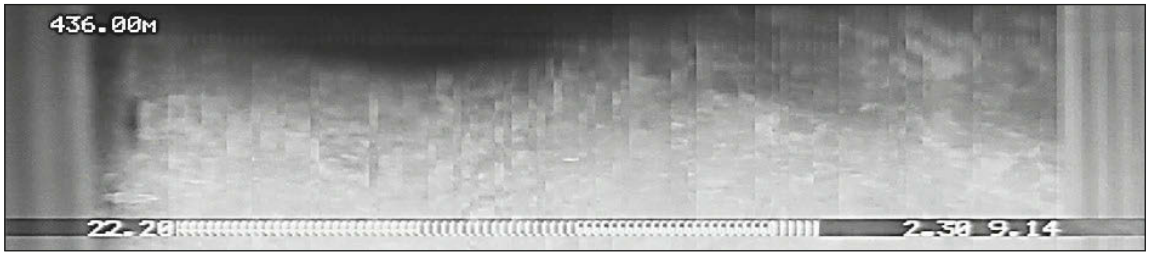

Рис. 7. Монолитный участок массива. Скважина Р-1, глубина 436,00 м

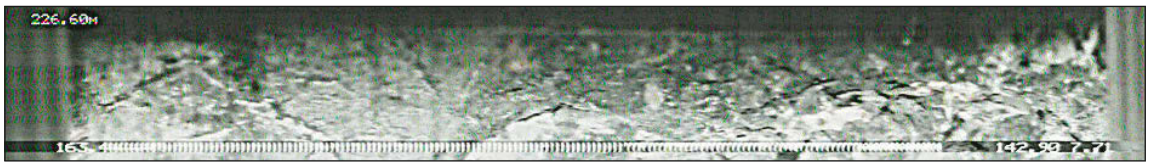

Рис. 8. Открытые и минерализованные трещины на глубине 226,60 м (скважина Р-3)

проведения линеаментного анализа. Основную ценность при проведении обработки представляли панорамные снимки (360°) стволов скважин на различных глубинных интервалах (рис. 6).

В целом, исходя из результатов проведенных обследований на целевых интервалах глубин (400—500 м) — участке строительства подземной исследовательской лаборатории, массив можно охарактеризовать в большей своей части как монолитный (рис. 7).

В некоторых участках присутствуют различные нарушения сплошности геологической среды. В основном, это системы трещин, включая единичные трещинные проявления — минерализованные и открытые (рис. 8).

Методика обработки результатов исследований

В ходе проведенных обследований было сформировано около 1000 панорамных изображений и около 10 Гбайт видеофайлов. Оперативная обработка больших объемов данных потребовала использования автоматизированных методов. Для камеральной обработки первичной информации — панорамных снимков участков стволов скважин с выявленными структурными нарушениями — был применен автоматический цифровой линеаментный анализ, алгоритм которого представлен на рис. 9.

Привязка изображения в локальной прямоугольной системе координат производилась с использованием географической информационной системе (ГИС) QGIS [8]. Для того чтобы задать прямоугольную проекцию изображению, осуществлялось его сохранение из ГИС с указанием требуемой проекции (использована проекция Google Maps Global Mercator, имеющая EPSG–90091). Направленная фильтрация была использована для улучшения характеристик изображения, имеющего определенные градиенты направления. Направленная фильтрация изображения традиционно производится по трем основным направлениям: N-S

Рис. 9. Алгоритм обработки панорамных снимков скважин

к 0°, NE-SW к 45°, E-W к 90°, с целью подчеркнуть все возможные направления структур изображения [9]. Опытным путем был установлен размер ядра свертки (13 × 13) пикселей. Данный выбор обоснован тем, что на обрабатываемых изображениях имеются помехи и при меньшем размере ядра фильтра проявляются искажения, не связанные со структурными особенностями стенок скважин. Исходное изображение состоит из трех спектральных каналов: R, G, B. В данном случае, на вход фильтра подали R канал, так как данные полученные в красном и инфракрасном спектральных диапазонах более чувствительны к геолого-структурным особенностям.

На рис. 10 представлены исходное изображение панорамы с глубинной отметкой 117.35 метров скважины Р-3 (рис. 10а), а также RGB композитное изображение, составленное из результатов направленной фильтрации изображения по основным направлениям: N-S к 0°, NE-SW к 45°, E-W к 90°, красный канал представлен результатом фильтрации в направлении E-W, зеленый канал направлением NE-SW и синий канал направлением NW-SE (рис. 10б).

Автоматическое извлечение линеаментов осуществлялось в два этапа: первым шагом является процедура обнаружения границ, которая предоставляет информацию об областях резких изменений значений в соседних

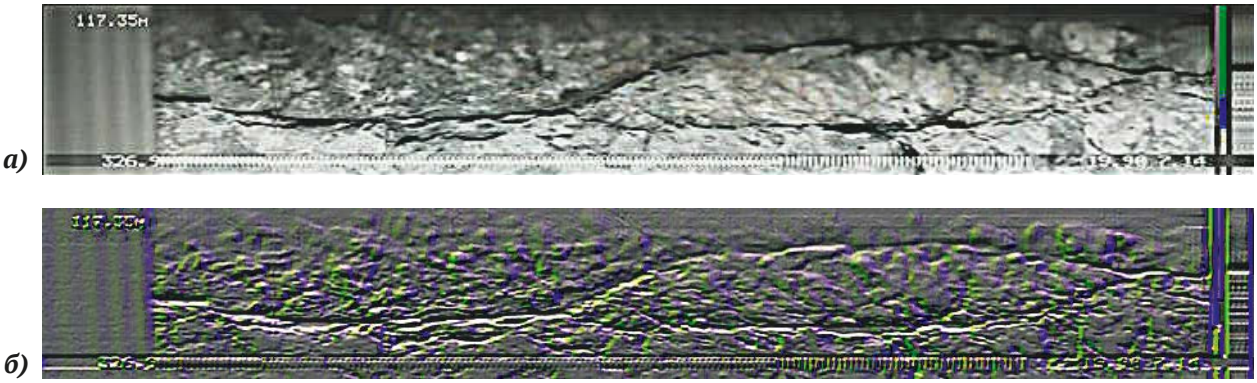

Рис. 10. а) Оригинальное изображение панорамы с глубинной отметкой 117,35 метров скважины Р-3; б) RGB-композитное изображение, составленное в результате применения трех направленных фильтров (N—S, NE—SW, E—W) с ядром свертки 13×13 пикселей

Рис. 11. Извлеченные линеаменты совместно с оригинальным RGB-изображением

пикселях, а вторым шагом является процедура обнаружения кривых [8]. Эти шаги выполнялись с использованием модуля LINE программного обеспечения PCI Geomatica, наиболее широко используемого модуля для автоматического извлечения линеаментов [11] (рис. 11). На втором этапе извлекались кривые и осуществлялось их преобразование в векторную форму путем связывания отрезков линии. После этого создавались полилинии, объединялись в линеамент [11]. Вычисление значений азимутов падения и простирания, а также построение роз диаграмм производилось в геоинформационной системе QGIS. На основе встроенного в нее функционала и при помощи расширений (плагинов), был создан полуавтоматический алгоритм вычисления азимутов падения и простирания линеаментов, а также их длин. Непосредственно розы-диаграммы строились при помощи расширения для QGIS "Line Direction Histogram". Данный модуль автоматически рассчитывает азимуты линеаментов и на их основе строит диаграмму. Также в модуле есть возможность указать шаг угла в градусах. Для текущей задачи шаг угла был установлен в 18 градусов.

Анализ результатов обработки изображений

Проведенный анализ составленных роз-диаграмм для определенных интервалов и обобщенных по каждой из обследованных скважин позволил сформировать ряд выводов о том, что во всех обследованных скважинах большинство трещин имеют пологое падение. По простиранию для скважин Р-1, Р-3, Р-4, Р-5 нет преобладающих систем трещиноватости. В скважинах Р-1, Р-4, Р-5 и 1-Е не выделяется выраженных субмеридиональных систем. Наиболее значимые нарушения в скважине Р-1 встречаются на интервале 122—130 м, что соответствует контактам пород в данной зоне массива. Следующий, относительно интенсивно нарушенный интервал располагается в пределах глубинных отметок 223—229 м, что отвечает дайке матадолеритов и ее контакту с толщей переслаивания биотитовых и кордиерит-биотитовых гнейсов. Также в этой скважине встречаются и единичные открытые трещины с большой апертурой раскрытия — например, на отметках 248,7; 248,85; 283,15 м. В скважине Р-3 не было обнаружено длительных интервалов с сильно нарушенными породами. Наиболее значительные нарушения сплошности массива в Р-3 зафиксированы на интервале 117,35 м (что соответствует контакту ортоамфиболитов и биотитовых плагиогнейсов), на глубине 163,15 м отмечается крупная раскрытая трещина, что соответствует контактной зоне биотитовых плагиогнейсов и маломощной дайки метадолеритов, открытые трещины наблюдаются на интервалах 189,45—189,5; 219,75; 226,65 м. При обследовании скважин Р-4 и Р-5 не было обнаружено значительных нарушений сплошности пород, большинство трещин слабораскрыты или полностью минерализованы.

В качестве примера приведены обобщенные розы-диаграммы по скважине Р-8 (рис. 12), позволившие сделать вывод, что большинство трещин на участке ее проходки имеют пологое падение, а по простиранию выделяются ССЗ и ССВ системы. В ходе движения зонда в стволе скважины Р-8 на глубине 179 м был обнаружен завал скважины, пройти который не представлялось возможным. Таким образом, детально изучен был только небольшой интервал скважины, на отметке 131,65 м были обнаружены значительные нарушения сплошности. В интервалах обследований скважины 1-Е породы сильно нарушены, встречаются трещины с апертурой раскрытия, превышающей 1 см. Повышенная нарушенность массива пород приурочена к местам контактов пород с различными физико-механическими свойствами. Однако в случае скважины 1-Е такую закономерность установить невозможно, поскольку на интервале наблюдения явный контакт двух сред с различными свойствами наблюдается только в самом начале интервала наблюдения, а далее интервал наблюдения включает в себя толщу биотитовых плагиогнейсов. По скважине ПР-1 сделан вывод, что большинство трещин имеют субгоризонтальную ориентировку по падению, но в то же время выделяется субмеридианальная система. Системы выделяются по СЗ простиранию. В результате глубокой обсадки данной скважины, интервал изучения получился весьма небольшим. Также исследование в значительной степени усложняла высокая замутненность воды в стволе скважины.

Заключение

В ходе работы, по результатам исследований прискважинных зон существующих скважин было проведено уточнение геологического строения участка сооружения ПИЛ. Уточнение производилось с использованием данных видеокаротажа по 7 глубоким скважинам, пробуренным на территории участка «Енисейский». Для интерпретации данных видеообследования была применена автоматизация процесса обработки с применением программного обеспечения, адаптированного под конкретную

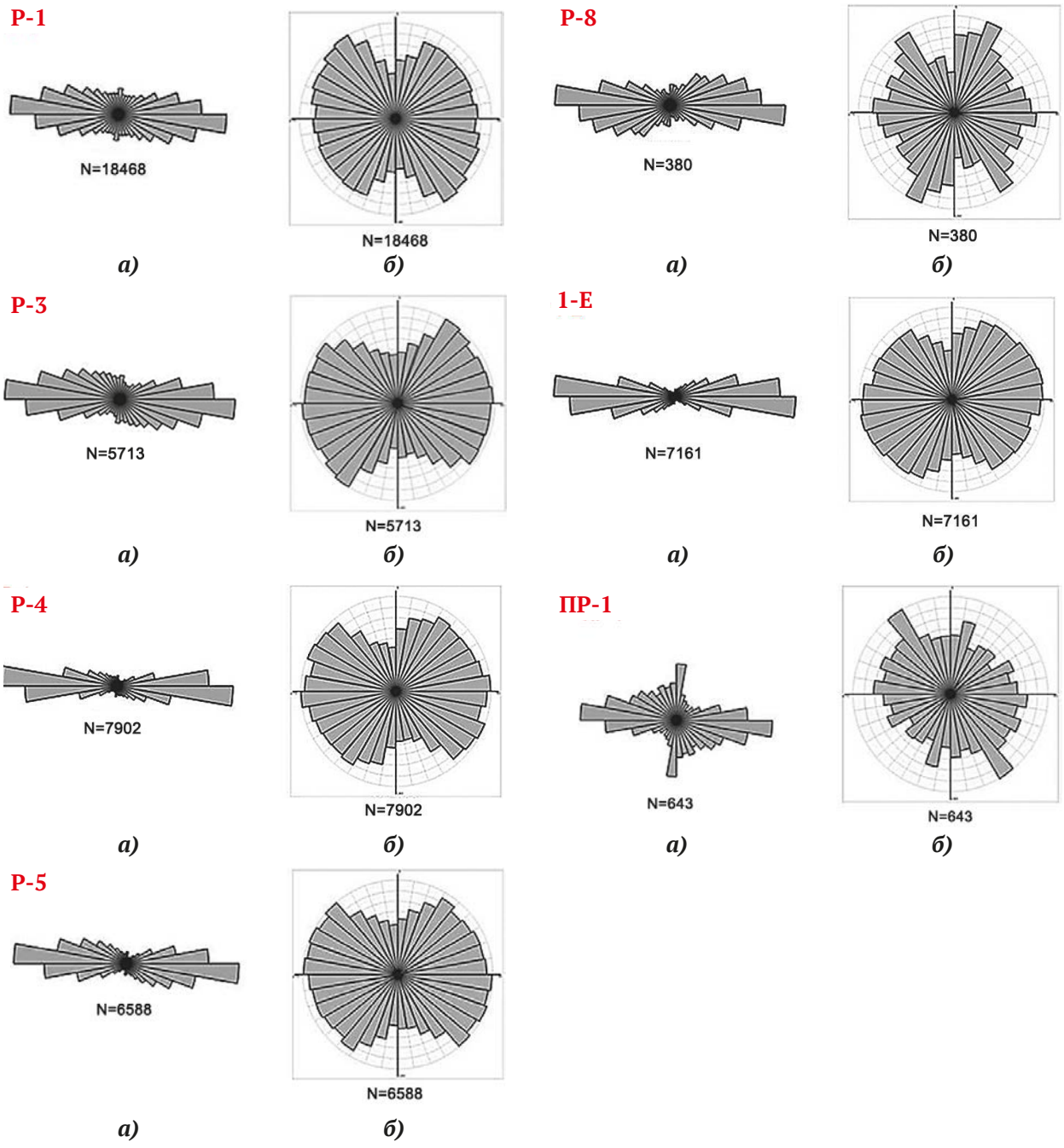

Рис. 12. Обобщенные розы-диаграммы, составленные по итогам обследований стволов скважин: а) по азимутам падения; б) по азимутам простирания. N – количество объектов

задачу. Также был разработан полуавтоматический алгоритм вычисления азимутов падения, простирания и длин линеаментов на основе геоинформационной системы QGIS. В результате было получено представление о пространственном распределении наиболее существенных систем трещиноватости, выявлены наиболее нарушенные участки стенок скважин.

Принимая во внимание полученные результаты полевого сезона 2020 года изучение прискважинных зон планируется продолжить в 2021 году после прочистки стволов скважин до проектных глубин. Первичный объем накопленных данных по итогам исследований планируется задействовать в т. ч. для применения в DFN-моделях [12]. Наибольший интерес для последующего изучения представляют выявленные участки с развитыми системами трещин, которые должны быть дополнительно исследованы в целях уточнения гидрогеологических параметров, в частности: на них планируется

выполнение поинтервальных нагнетаний с использованием пакерных систем, а также дополнительных модулей зонда, позволяющих определить направление потока в стволе в районе зон структурных нарушений массива. Также будут дополнены описания трещиноватости и начаты работы по вычислению фильтрационных параметров массива, в т. ч. его анизотропии.

Литература

1. *Кочкин Б. Т.* Задачи изучения геологической среды участка Енисейский на текущем этапе реализации проекта захоронения // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 76—91.
2. *Морозов О. А., Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д.* Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 46—62.
3. *Караулов В. А., Заблоцкий К. А.* Геологическое доизучение (оценочная стадия) горного массива участка «Енисейский» для обоснования расширения интервала захоронения радиоактивных отходов до глубин 450—525 метров (+5— –70 м БС) объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижнеканский массив) / ОАО «Красноярскгеология», Красноярск, 2015.
4. *Лаверов Н. П., Величкин В. И., Кочкин Б. Т., Мальковский В. И., Петров В. А.* Методологические основы исследований на завершающем этапе выбора площадок для размещения хранилищ отработавших ядерных материалов в кристаллических породах // Геоэкология, 2010. № 1. С. 3—12.
5. *Озерский А. Ю., Заблоцкий К. А.* Геологические исследования (поисковая стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижнеканском массиве (участок «Енисейский») / ОАО «Красноярскгеология», Красноярск, 2010.
6. *Озерский А. Ю., Заблоцкий К. А.* Геологические исследования (оценочная стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижнеканском массиве (участок «Енисейский») / ОАО «Красноярскгеология», Красноярск, 2011.
7. *Гупало В. С., Казаков К. С., Коновалов В. Ю., Неуважаев Г. Д., Озерский Д. А.* Анализ подходов к консервации и ликвидации скважин на участке недр «Енисейский» (Красноярский край, Нижнеканский массив) // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 30—41.
8. Сайт “Документация QGIS 2.x” [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://docs.qgis.org/2.18/ru/docs/user_manual/index.html
9. Süzen, L. Toprak V. Filtering of Satellite Images in Geological Lineament Analyses: An Application to a Fault Zone in Central Turkey. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(6), pp. 1101—1114.
10. *Hirono T., Takahashi M., Nakashima S.* In situ visualization of fluid flow image within deformed rock by X-ray CT // Engineering Geology. – 2003. – № 70 (1-2). Pp. 7—46.
11. *Hashim M., Ahmad S., MdJohari M. A., Pour A. B.* Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery. Adv. Space Res. 2013, 51, pp. 874–890.
12. *Kozyaev Andrey & Schukovsky Rodion & Zakrevsky Konstantin*. (2019). Моделирование трещиноватости, практикум по DFN в Petrel 2016 – 2019 (Fracture modeling in Petrel 2016—2019).

Информация об авторах

Гупало Владимир Сергеевич, доктор технических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: gupalo@ibrae.ac.ru.

Казаков Константин Сергеевич, заместитель заведующего лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: kks@ibrae.ac.ru.

Минаев Василий Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: minaev2403@mail.ru.

Озерский Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: oda@ibrae.ac.ru.

Устинов Степан Андреевич, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: stevesa@mail.ru.

Нафигин Игорь Олегович, младший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: estera-st@mail.ru.

Библиографическое описание статьи

Гупало В. С., Казаков К. С., Минаев В. А., Озерский Д. А., Устинов С. А., Нафигин И. О. Результаты исследований в существующих скважинах на участке недр «Енисейский», в т. ч. для определения основных систем трещин и анизотропии массива пород // Радиоактивные отходы. 2021. № 1 (14). С. 76—86. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-76-86.

RESULTS OF STUDIES IN THE EXISTING WELLS OF THE YENISEYSKIY SUBSURFACE SITE INCLUDING THOSE PERFORMED TO IDENTIFY THE MAIN FRACTURE SYSTEMS AND ROCK ANISOTROPY

Gupalo V. S[1], Kazakov K. S[1], Minaev V. A.[2], Ozerskiy D. A.[1], Ustinov S. A.[2], Nafigin I. O.[2]

[1] **Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia**

[2] **Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia**

Article received on February 16, 2021

The conditions in the crystalline geological massif, which determine the long-term safety of radioactive waste disposal, are reduced to two fundamental factors - the features of the host rocks and the fracture network inherent in the studied area of the massif [3]. Refinement of the parameters identified at the early stages of geological study of cracks is one of the highest priority tasks in the safety assessments of the radioactive waste disposal. These parameters should also be taken into account in the formation of requirements for the composition and structure of the system of engineering barriers preventing the release of radionuclides outside the disposal. The presented material contains a description of the work and the approaches applied in processing the results of borehole surveys of the prospecting and appraisal stages of geological exploration of the Yeniseisky area, performed using the specialized probe with video logging equipment.

Keywords: *radioactive waste, radioactive waste disposal, underground research laboratory, rock mass characterization, studies of the near-wellbore zone, video survey of wells, identification of the main fracture systems.*

References

1. Kochkin B. T. Zadachi izucheniya geologicheskoy sredy uchastka Yeniseyskiy na tekushchem etape realizatsii proyekta zakhoroneniya [Investigating the Geological Environment at the Yeniseisky Site: Tasks for the Current Stage of the Disposal Project]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 2 (7), pp. 76—91. DOI: 10 25283/2587-9707-2019-2-76-91.

2. Morozov O. A., Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D. Otsenka sostoyaniya geologicheskoy sredy uchastka Yeniseyskiy (Krasnoyarskiy kray) [Assessing the State of the Geological Environment at the Yeniseyskiy Site (Krasnoyarsk Region)]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 46—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.

3. Karaulov A. V., Zablotsky K. A. Geologicheskoe doizuchenie (otsenochnaya stadia) gornogo massiva uchastka Eniseiskyi dlya obosnovaniya rasshireniya intervala zakhoroneniya radioaktivnyh othodov do glu-bin 450—525 m obectov okonchatelnoi izolyatsyi radio-aktivnyh othodov (Krasnoyarskyi krai, Nizhne-Kanskyi massiv) [Geological study (evaluation stage) of Yeni-sei site to justify the extension of the interval of the disposal of radioactive waste to depths of 450—525 meters of objects for final

isolation of radioactive waste (Krasnoyarsk region, Nizhnekansky massif)] Krasnoyarsk, JSC «Krasnoyarsk Geology», 2015

4. Laverov N. P., Velichkin V. I., Kochkin B. T., Mal'kovskii V. I., Petrov V. A. Metodologicheskie osnovy issledovanij na zavershayushchem etape vybora ploshchadok dlya razmeshcheniya hranilishch otrabotavshih yadernyh materialov v kristallicheskih porodah [Nvestigation methodology fundamentals at the final stage of selecting sites for spent nuclear fuel disposal in crystalline rocks] // *Geoekologiya — Geoecology*, 2010, no.1, pp. 3—12.

5. Ozersky A. Yu., Zablotsky K. A. Geologicheskie issledovaniya (poiskovaya stadiya) obekta okonchat-elnoi izolyatsii radioaktivnyh othodov na Nizhnekanskom massive (uchastok Eniseiskyi) [Geological study (prospecting stage) of the facility for final isolation of radioactive waste in Nizhnekansky massif (the Yenisei site)] Krasnoyarsk, JSC «Krasnoyarsk Geology», 2010

6. Ozersky A. Yu., Zablotsky K. A. Geologicheskie issledovaniya (otsenochnaya stadiya) obekta okonchatelnoi izolyatsii radioaktivnyh othodov na Nizhnekanskom massive (uchastok Eniseiskii) [Geological study (evaluation stage) of the facility for final iso-lation of radioactive waste in Nizhnekansky massif (the Yenisei site)] Krasnoyarsk, JSC «Krasnoyarsk Geology», 2011

7. Gupalo V. S. , Kazakov K. S. , Konovalov V. Yu., Neuvazhaev G. D., Ozerskiy D. A. Evaluation of Approaches for Well Abandonment and Temporary Shutdown at the «Yeniseiskiy» Site (Krasnoyarsk Territory, Nizhnekanskiy Massif). *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive waste*, 2020, no. 4 (13), pp. 30—41. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-30-41 .

8. Web-site "Documentation QGIS 2.x" [Electronic resource]. URL: https://docs.qgis.org/2.18/ru/docs/user_manual/index.html.

9. Süzen L., Toprak V. Filtering of Satellite Images in Geological Lineament Analyses: An Application to a Fault Zone in Central Turkey. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, vol. 19, no. 6, pp. 1101—1114.

10. Hirono T., Takahashi M., Nakashima S. In situ visualization of fluid flow image within deformed rock by X-ray CT // *Engineering Geology.* — 2003. — № 70 (1—2). — pp. 7—46.

11. Hashim M., Ahmad S., MdJohari M. A., Pour A. B. Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery. *Adv. Space Res.*, 2013, vol. 51, pp. 874—890.

12. Modelirovanie treshchinovatosti. Praktikum po DFN v Petrel 2016—2019 [Fracture modeling in Petrel 2016—2019]. Edt. by K. E. Zakrevsky. Moscow, MAI Publ., 2019. 96 c.

Information about the authors

Gupalo Vladimir Sergeevich, Doctor of technical sciences, Head of Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: kks@ibrae.ac.ru.

Kazakov Konstantin Sergeevich, Deputy chief of Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: kks@ibrae.ac.ru.

Minaev Vasily Aleksandrovich, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Laboratory, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russia), e-mail: minaev2403@mail.ru.

Ozerskiy Dmitriy Andreevich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: oda@ibrae.ac.ru.

Ustinov Stepan Andreevich, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy Director for Research, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russia), e-mail: stevesa@mail.ru.

Nafigin Igor Olegovich, Junior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russia), e-mail: estera-st@mail.ru.

Bibliographic description

Gupalo V. S., Kazakov K. S., Minaev V. A., Ozerskiy D. A., Ustinov S. A., Nafigin I. O. Results of studies in the existing wells of the Yeniseyskiy subsurface site including those performed to identify the main fracture systems and rock anisotropy. Radioactive waste, 2021, no. 1 (14), pp. 76—86. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-76-86. (In Russian).