DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62 УДК 550.8.02:621.039

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ УЧАСТКА ЕНИСЕЙСКИЙ (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ)

О. А. Морозов, А. В. Расторгуев, Г. Д. Неуважаев

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 2 декабря 2019 г.

В статье рассмотрены основные черты геологического строения участка «Енисейский», на котором предполагается размещение пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО). Созданы элементы 3D-геологической модели в среде Micromine и выделены особенности геологического строения, которые необходимо учитывать в дальнейшей работе. Рассмотрена связь фильтрации подземных вод с дизъюнктивными структурами. Отмечается, что дальнейшее изучение участка в целях безопасного размещения хранилища необходимо проводить на основе выполнения геологоразведочных работ разведочной стадии.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, глубинное захоронение РАО, геологические и гидрогеологические исследования, геологоразведочные работы, обеспечение безопасности.*

Введение

Исследования, направленные на выбор участка для размещения пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) в Красноярском крае, проводятся с 1992 г. [1—4]. На участке Енисейский выполнены геологоразведочные работы (ГРР) поисковой (2003—2010 гг.) и оценочной (2010—2014 гг.) стадий [5, 6, 7]. Пробурено 24 скважины глубиной 100,0—700,3 м, общей протяженностью 11 161,1 м, выполнена геологическая документация керна, проведены опытно-фильтрационные работы, площадные и скважинные геофизические исследования (рис. 1), составлены геологические колонки буровых скважин в масштабе 1 : 500, схематические геологические разрезы и геологическая карта масштаба 1 : 10 000 на площадь 6,2 км^2. В 2016 г. Протоколом ГКЗ Роснедра [12] участок недр «Енисейский» был признан потенциально пригодным для глубинного захоронения радиоактивных отходов в объеме до 160 тыс. м^3 в архейских гнейсах участка в целевом интервале глубин 450—525 м и отнесен к категории оцененных. Распорядитель недр предложил недропользователю перейти к разведочной стадии геологоразведочных работ (ГРР). Однако, после завершения в 2015 г. оценочной стадии, других геологоразведочных работ на площади участка «Енисейский» не проводилось.

Цель настоящей статьи — на основе обобщения и анализа имеющегося в настоящее время первичного фактического материала осуществить оценку состояния геологической среды участка, показать необходимость и направления его дальнейшего изучения в соответствии с действующими нормативными документами и практикой ведения ГРР для выполнения обоснованной оценки безопасности размещения РАО.

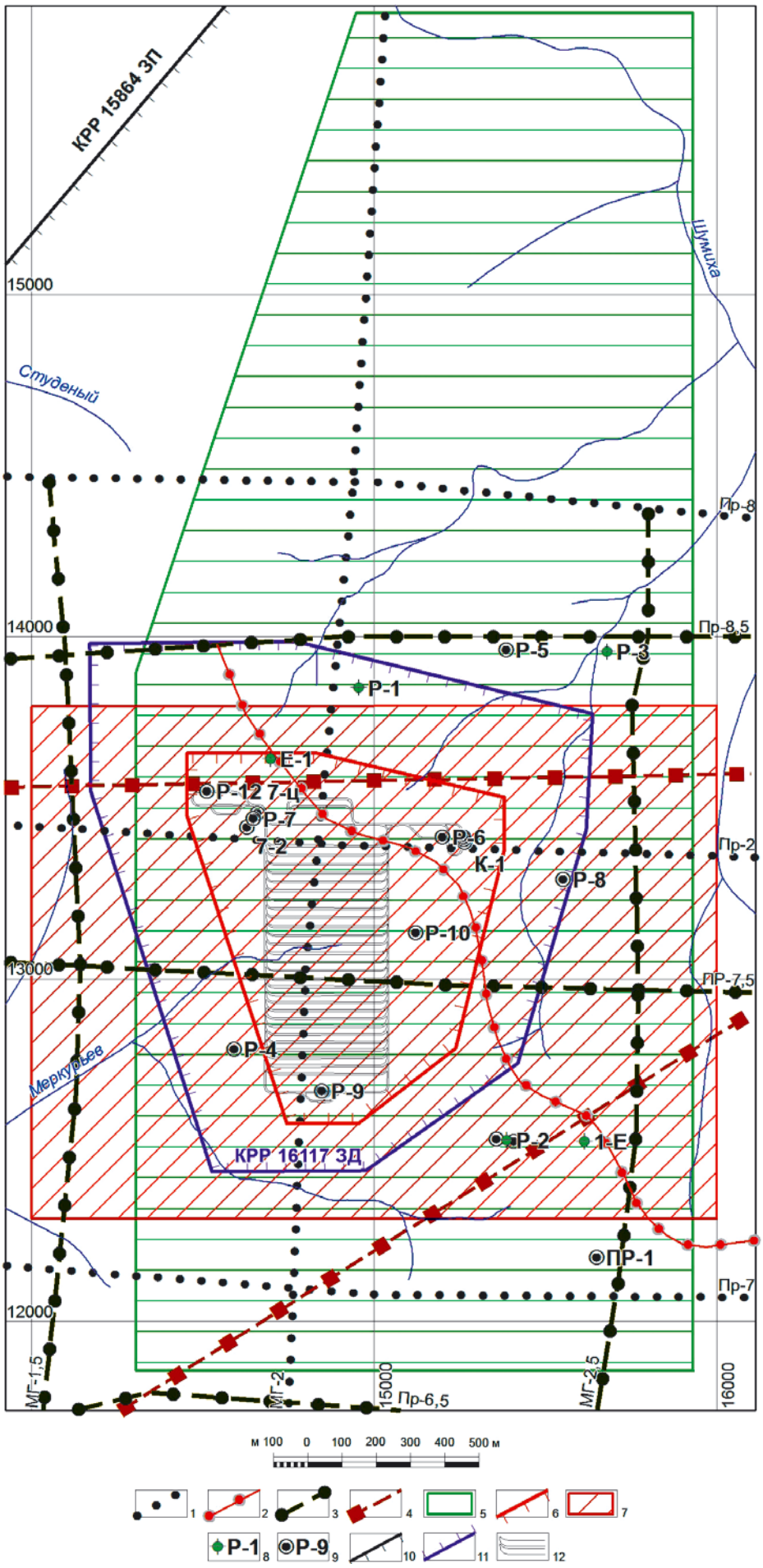

Рис. 1. Карта фактического материала площадки размещения проектируемого ПГЗРО на участке Енисейский

1–4 — магистрали и профили среднемасштабных геофизических работ 2002–2005 гг. [8, 9]:

1 — гравиметрии, магнито- и сейсмо- и электроразведки методами АМТЗ, ВЭЗ, ПП (2002–2004 гг.);

2 — сейсморазведки 2002 г.;

3 — электроразведки методами АМТЗ и ПП (2005 г.);

4 — гравиразведки (2005 г.);

5–6 — площадные геофизические исследования:

5 — магниторазведка по сети 100×10 м, сейсморазведка по сети 100×25 м, ВЭЗ; схематическая геологическая карта масштаба 1:10000 [6, 7];

6 — магнитная съемка масштаба 1:2500 по сети 10×5 м [10]; 7 — площадь карты линейных магнитных аномалий масштаба 1:5000 [7];

8–9 — точки расположения буровых скважин и их номера:

8 — поисковых (2003–2009 гг.),

9 — оценочных (2010–2014 гг.) [7];

10–11 — контуры лицензионных площадей:

10 — КРР 15864 ЗП,

11 — КРР 16117 ЗД;

12 — предполагаемый контур хранилища на горизонтах +5 и –70 м [11].

Линии профилей 2002–2005 гг. выходят за пределы рисунка

Методика работ

Геологическое строение участка охарактеризовано по первичным данным геологической документации керна буровых скважин [6, 7], выполненной геологами Ивановской геологоразведочной экспедиции С. А. Арефьевым, В. Г. Голубевым, В. А. Астраханцевым, результатам геофизических исследований скважин и детальных площадных магнитометрических наблюдений [10], а также по материалам региональных геологических исследований [15—20]. Основываясь на результатах этих работ, нами выполнены:

- анализ мелко- и среднемасштабных геологических карт;
- составление колонок скважин и базы геологических данных (11 840 строк);
- построение геологических разрезов вкрест простирания структуры;
- геологическая интерпретация материалов детальной площадной магнитометрической съемки;
- составление предварительной схематической геологической карты масштаба 1 : 10 000;
- построение продольного геологического разреза;
- сбивка разрезов и внесение корректив в геологическую карту;
- составление схемы геологического строения на горизонте –70 м (рис. 2) и элементов 3D-геологической модели в среде Micromine.

Основные черты геологического строения

Участок приурочен к зоне сочленения региональных тектонических структур — байкальского сооружения Енисейского кряжа и эпигерцинской Западно-Сибирской плиты, контактирующих по системе субмеридиональных взбросов. Амплитуда смещений докембрийского фундамента по поверхности ближайшего (в 4 км к западу от участка) глубинного Приенисейского (Атамановского, Муратовского) разлома оценивается величиной в 2—2,5 тыс. м, в том числе не менее 500—700 м в течение кайнозоя [19]. Л. П. Никулов с соавторами [16] относят этот разлом к числу сейсмоактивных. Признаки активизации с амплитудой плейстоценовых смещений в 50—120 м имеют и другие разрывные нарушения района, формируя в совокупности Байкало-Енисейскую разломную зону субмеридионального простирания шириной 25—30 км [19].

Участок сложен первично осадочными, вулканогенно-осадочными образованиями архейского возраста, метаморфизованными в условиях гранулитовой [15] или высоких ступеней амфиболитовой [16, 20] фаций регионального метаморфизма. В современной геологической среде они представлены плагиогнейсами и гнейсами, содержащими прослои и пачки кордиеритсодержащих кристаллических сланцев.

В пределах участка развиты интрузивные образования, прорывающие толщу метаморфических пород. Они представлены раннепротерозойскими апогаббровыми ортоамфиболитами ярлычихинского и гранито-гнейсами таракского (?) комплексов, позднерифейскими дайками метадолеритов токминского и трахидолеритов шишинского комплексов. В составе интрузивных образований преобладают метадолериты, формирующие густую сеть даек с мощностью тел до 30 м, круто падающих в восточных румбах. В непосредственной близости от участка закартированы позднерифейские гранитоиды нижнеканского комплекса. С таракскими и нижнеканскими образованиями связываются процессы гранитизации и ретроградного метаморфизма вмещающих их пород. Все породы пронизаны гидротермальными кварцевыми, карбонат-кварцевыми и карбонатными прожилками, пространственно связанными с образованиями токминского комплекса и несущими вкрапленность и гнездовые выделения сульфидов — пирита (FeS_2) и халькопирита ($CuFeS_2$). Состав и содержание элементов-примесей в сульфидах не изучались.

Архейские, раннепротерозойские и позднерифейские образования перекрыты плиоцен-нижнечетвертичной (?) корой выветривания линейно-площадного типа мощностью 5—25 м и повсеместно развитым чехлом четвертичных отложений мощностью до 30 м, что определяет закрытый характер территории и затрудняет составление геологической карты участка.

Верхняя часть разреза докембрийских образований представляет собой трещиноватую зону экзогенной дезинтеграции и разуплотнения мощностью 5—30 м. До глубины 80—120 м в породах развита приповерхностная зона окисления. Максимальные мощности коры выветривания, четвертичных отложений и зоны приповерхностного окисления приурочены к зонам разрывных нарушений, развитых в коренных породах.

Разрывные нарушения представлены зонами дробления, милонитизации, тектоническими брекчиями и разрывами без смещения — трещинами, зонами повышенной трещиноватости, выщелачивания и проницаемости. Названные структуры являются широко

распространенными элементами геологического строения участка.

В материалах геологической документации керна скважин выделено 293 зоны дробления, среди которых преобладают зоны со стволовой мощностью 0,1—0,7 м. Доля зон дробления со стволовой мощностью более 1 м составляет 19,1 %. Максимальная мощность (38,1 м) отмечена в скв. Р-3 (инт. 32,0—70,1 м), значительные интервалы раздробленных пород протяженностью 5,2—22,0 м выявлены в скв. Р-2ц, 5, 6, 7-2, 8, 10, 11-1, 13, 1-Е. В северо-восточной части участка пространство между сближенными зонами дробления сложено линзообразным телом тектонических брекчий мощностью около 30 м (рис. 2). В разрезе отмечается наличие участков сгущения и разрежения зон дробления, характерное для тектонических структур сколовой кинематики.

Выделяются главные и второстепенные разрывные нарушения. Главные нарушения пересекают всю площадь участка и простираются в субмеридиональном направлении. К их числу относятся разломы Верхнешумихинский, Верхнемеркурьевский и Меркурьевский (рис. 2), представленные зонами дробления. Поверхности разрывных нарушений круто (60—70°) погружаются в восточных румбах, местами выполаживаются на глубине и разбивают участок на ряд блоков-пластин мощностью 50—350 м (рис. 3). К числу главных разрывных нарушений может относиться и разлом Безымянный

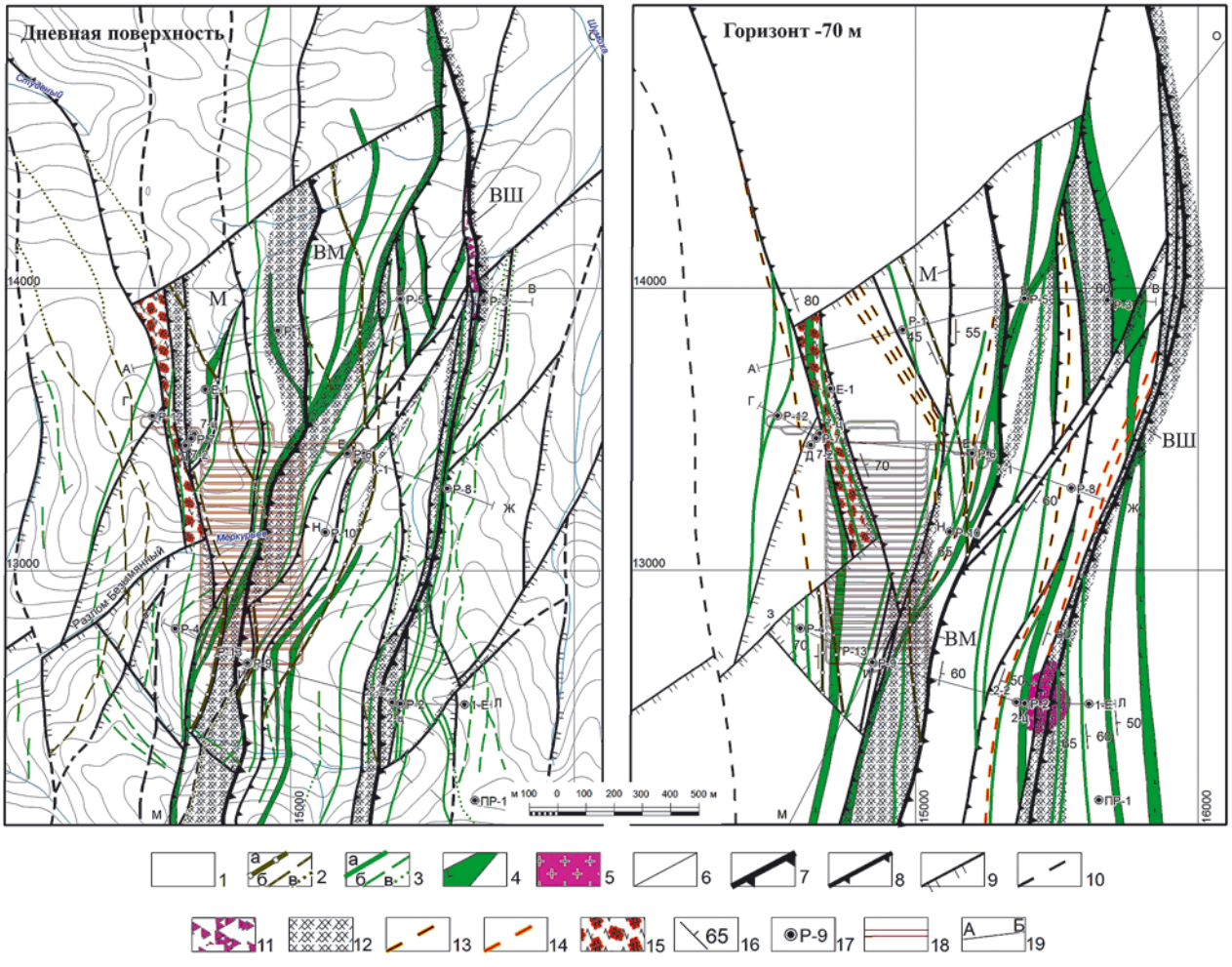

Рис. 2. Схема геологического строения участка размещения проектируемого ПГЗРО

1 — архейские гнейсы и кристаллические сланцы; 2—4 — позднерифейские дайки: долериты, трахидолериты (2), метадолериты (3, 4), установленные по данным бурения (а), по геофизическим данным (б), предполагаемые (в); 5 — раннепротерозойские гнейсо-граниты (?); 6 — геологические границы; 7—10 — разрывные нарушения: 7—8 — установленные по данным бурения главные (7) и второстепенные (8), 9 — установленные по геофизическим данным, 10 — предполагаемые; 11 — тектонические брекчии; 12—13 — зоны повышенной трещиноватости, отражающиеся в масштабе схемы (12) и внемасштабные (13); 14 — зоны милонитизации; 15 — зоны смятия; 16 — элементы залегания; 17 — буровые скважины и их номера; 18 — контур проектируемого ПГЗРО на горизонтах +5 и –70 м (абс. отм.); 19 — линии геологических разрезов.
Буквами обозначены разломы: ВШ — Верхнешумихинский, ВМ — Верхнемеркурьевский, М — Меркурьевский

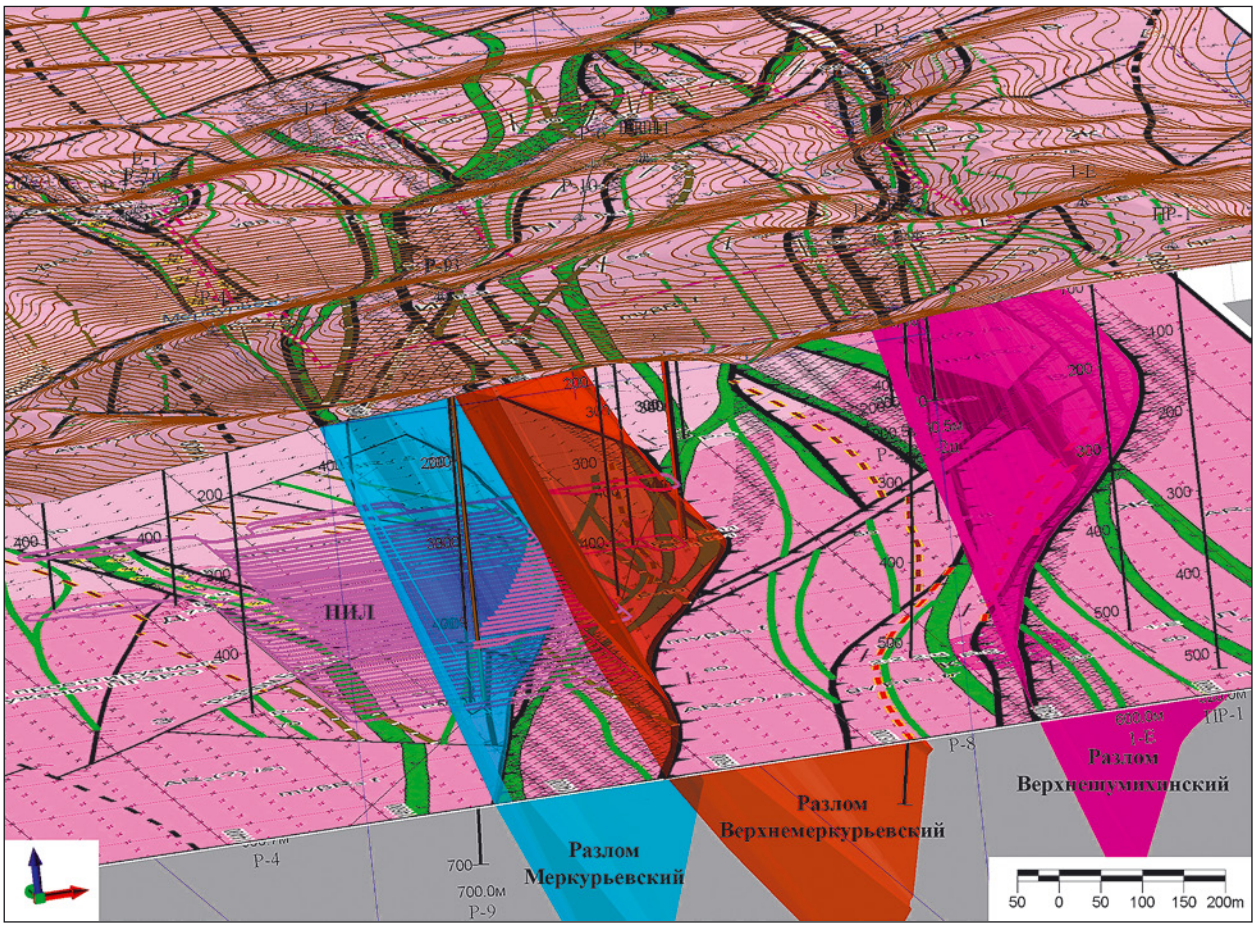

Рис. 3. 3D-вид главных разрывных нарушений
ПИЛ — подземная исследовательская лаборатория (проектируемая)

северо-восточного простирания, выделенный по геофизическим данным в 2005 г., проходящий в юго-западной части площади вдоль долины руч. Меркурьев и пока не вскрытый буровыми скважинами. Истинная мощность зон разломов достигает 37,6 м, испытывая местами линзообразное сужение до 2,4 м и вырождаясь в зоны милонитизации и рассланцевания. Разломы Верхнемеркурьевский и Меркурьевский относятся к числу водоподводящих структур.

Субмеридиональные тектонические структуры были сформированы, скорее всего, в результате взбросовых (сдвиго-взбросовых) перемещений, но в целом история их развития является более сложной и во многом не выясненной.

Второстепенные разрывные нарушения имеют северо-восточное, субмеридиональное, северо-западное простирания и незначительную протяженность, выполняя роль внутриблоковых структур. Их концентрация наиболее высока внутри блока, ограниченного Верхнешумихинским и Верхнемеркурьевским разломами.

Время проявления тектонических движений определяется тем обстоятельством, что дроблением затронуты как гнейсы, так и позднерифейские метадолериты и трахидолериты, что указывает на проявление или подновление тектонических движений в позднерифейскую эпоху. Это время связывается в регионе с проявлением активных фаз коллизии (940—920 и 750—730 млн лет). Другие этапы тектоно-магматической активизации региона сопоставляются с ранневендской (570—600 млн лет) и позднеордовикской-раннедевонской (400—450 млн лет) эпохами [18]. Отчетливая пространственная связь мощности коры выветривания и зоны приповерхностного окисления с развитыми на площади субмеридиональными разрывными нарушениями подтверждает существование последних, а увеличение мощности четвертичных отложений указывает на синседиментационную активность этих тектонических структур.

Разрывные нарушения без смещения представлены трещинами, зонами повышенной трещиноватости, зонами выщелачивания и проницаемости.

Трещины развиты во всех скальных породах. Они имеют протяженность от первых сантиметров до 1,2 м. Выделяются 3 системы трещин: крутопадающие, среднего падения и

пологозалегающие. Морфология всех систем трещин свидетельствует об их тектоническом происхождении и принадлежности к кинематическому типу трещин скалывания. Они характеризуются прямолинейной или слабо извилистой формой, развитием зеркал и борозд скольжения, пересекают гнейсы и прорывающие их дайковые тела. «Залеченность» трещин каолинитом и хлоритом отражает развитие тектонической глинки трения, которая легко разрушается при механическом воздействии. На кажущийся характер «залеченности» трещин обращают внимание и авторы работы [21]. Трещины всех направлений при своем образовании являлись сжатыми структурами, но на отдельных стадиях своего развития подвергались приоткрыванию, заполнялись гидротермальным кварцевым, сульфидно-кварцевым, карбонат-кварцевым или карбонатными материалом. Различные стадии минерализации разделялись новыми импульсами тектонических движений.

В пределах всего разреза развиты участки развития открытой трещиноватости, иногда — участки выщелачивания пород. В скважинах отмечается 94 интервала развития открытой трещиноватости протяженностью до 71,3 м, которые распространены вплоть до призабойной части скважин (например, скв. Р-1 — инт. 604,0—617,8 м, скв. Р-7 — инт. 585,5—611,0 м, скв. Р-8 — инт. 615,0—686,3 м). Для интервалов незначительной мощности характерно их близкое пространственное расположение.

Приоткрытые трещины преобладают среди пологозалегающих трещинных структур. Это свидетельствует о проявлении взбросовых перемещений по разрывным нарушениям, для которых характерно формирование оперяющих разрывы пологих трещин отрыва и приоткрывание ранее сформировавшихся пологозалегающих трещин скалывания. Приоткрытое состояние трещин связано, скорее всего, и с ориентировкой современного поля напряжений, которое обуславливает реализацию взбросовых дислокаций по разрывным нарушениям. Это подтверждается результатами изучения напряженного состояния пород в керне скв. Р-4 на интервале глубин 422—600 м [22]. Эти результаты показывают, что значения горизонтальных напряжений в породах, как правило, выше вертикальных, т. е. в настоящее время породы находятся преимущественно в состоянии горизонтального сжатия и вертикального растяжения. Это, безусловно, способствует раскрытию пологозалегающих трещинных структур.

Трещиноватость пород охарактеризована модулем трещиноватости $M_{тр}$ — количеством трещин на 1 пог. м керна. Более 60 % протяженности скважин имеют низкое значение $M_{тр}$ (1—10 тр./пог. м при среднем $M_{тр}$ = 6 тр./пог. м), однако оставшаяся часть скважин пересекает зоны повышенной трещиноватости.

Зоны повышенной трещиноватости (ЗПТ) пространственно тесно связаны с разрывными нарушениями и развиты по всему разрезу (рис. 4). Иногда ЗПТ встречаются обособленно, трассируя собой не сформировавшиеся зоны дробления. В пределах ЗПТ величина $M_{тр}$ изменяется от 10 до 45 тр./пог. м при среднем значении 24 тр./пог. м. Выделяется 137 интервалов повышенной трещиноватости пород, из которых около 65 % характеризуется стволовой мощностью более 10 м при величине $M_{тр}$ = 21—25 тр./пог. м. Наиболее протяженные (21,3—57,9 м) интервалы трещиноватых пород развиты в скв. Р-3, 4, 5, 6, 7, 7-2, 8, 9, 10, 13; максимальная величина ЗПТ (71,3 м) приурочена к интервалу 615,0—686,3 м в скв. Р-8.

Водопроницаемость

В гидрогеологическом отношении на участке выделяются обводненный горизонт рыхлых отложений и зона скальных архейских и протерозойских пород. Водопроницаемость скальных образований характеризуется значениями коэффициента фильтрации ($K_ф$), установленными по результатам опытно-фильтрационных работ в скважинах Р-1—Р-10. В большинстве случаев коэффициенты фильтрации имеют незначительную величину (до 9×10^{-4} м/сут). Однако 41,3 % определений показывают наличие повышенных значений $K_ф$, в которых его величина достигает $(26,5—171,5) \times 10^{-4}$ м/сут, что определяет неравномерность пространственного распределения водопроницаемых участков ниже зоны экзогенной дезинтеграции пород вплоть до глубоких горизонтов (рис. 5).

Участки, характеризующиеся повышенным $K_ф$, сопровождаются сериями маломощных (0,1—0,4 м) тектонических зон, состоящих из 3—25 элементов, участками выщелачивания пород, развития открытых трещин, а также зонами дробления со стволовой мощностью 1,0—8,1 м (табл. 1).

В скальных породах отмечаются участки установленного водопритока и предполагаемой повышенной водопроницаемости (табл. 2). Первые выделяются на основе прямых наблюдений, устанавливающих обводненность интервала, вторые — на основании развития в породах примазок гидроксидов: лимонита ($HFeO_2 \times nH_2O$), реже — гидрогематита ($Fe_2O_3 \times nH_2O$). На геологических

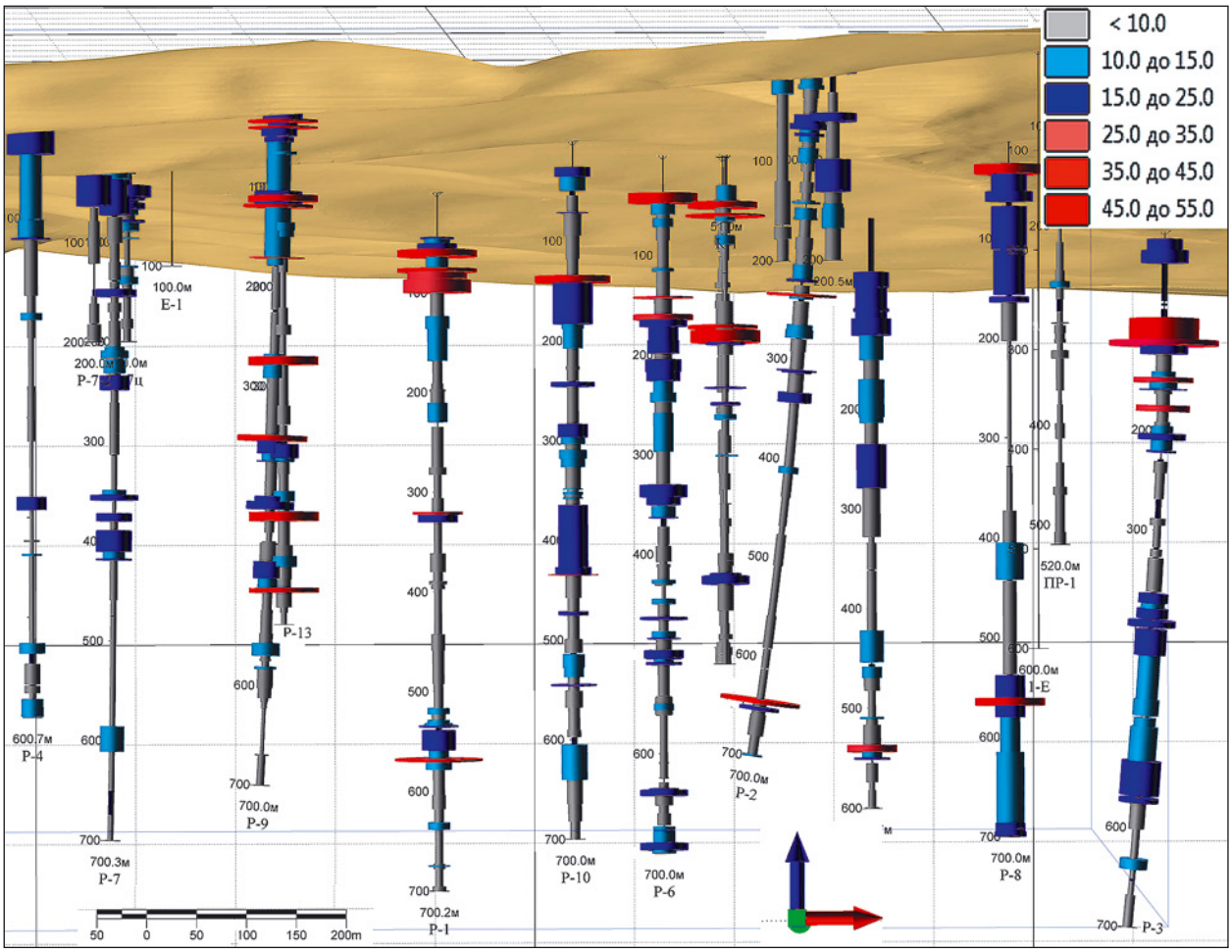

Рис. 4. Распределение модуля трещиноватости в породах по стволу скважин. Проекция 3D-вида на северо-северо-восток

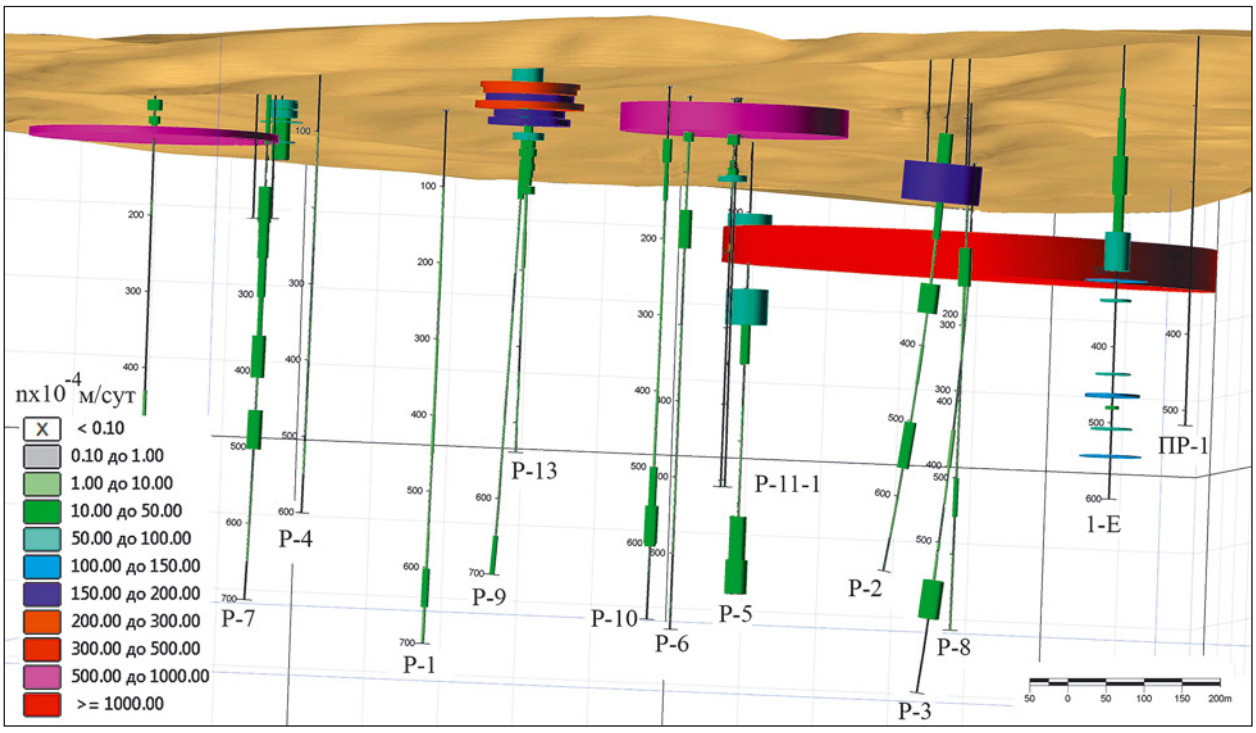

Рис. 5. Распределение коэффициента фильтрации в породах по стволам скважин

Таблица 1. Характерные интервалы буровых скважин с повышенными значениями $К_ф$ и развитием тектонических зон

№ скв.	Участок скважины, м			$К_ф$, $n×10^{-4}$ м/сут	Зоны дробления пород, м		
	от	до	длина		от	до	длина
Р-2	318,8	357,2	38,4	43,0	338,5	342,1	3,6
Р-3	100,0	150,0	50,0	1082,0	101,8	109,9	8,1
					119,7	121,2	1,5
	551,1	600,8	49,7	45,9	562,0	569,3	7,3
Р-5	102,6	150,0	47,4	97,0	126,2	132,0	5,8
	201,0	247,5	46,5	92,0	233,5	235,5	2,0
	499,5	556,1	56,6	36,0	507,4	508,9	1,5
	556,1	600,7	44,6	48,0	537,1	544,0	6,9
Р-7	158,6	205,1	46,5	29,0	154,4	161,1	6,7
					167,0	170,1	3,1
Р-10	551,0	600,0	49,0	29,0	597,4	599,6	2,2
Р-13	159,8	169,1	9,3	33,7	164,5	165,5	1,0

Таблица 2. Интервалы установленного водопритока и предполагаемой повышенной водопроницаемости скальных пород

№ скв.	Участок скважины, м		
	от	до	длина
Установленный водоприток			
Р-5	537,1	544,0	6,9
Интервалы предполагаемой повышенной водопроницаемости			
Р-1	87,1	100,2	13,1
Р-2ц	99,0	102,0	3,0
Р-7	353,8	359,0	5,2
Р-9	415,4	423,2	7,8
Р-10	135,0	135,8	0,8
Р-11	151,4	160,9	9,5
	408,9	411,9	3,0
Р-11-1	445,7	446,2	0,5
1-Е	277,5	277,7	0,2

разрезах отмечается пространственная связь выделяемых интервалов с зонами разрывных нарушений. Развитие гипергенных минералов указывает на существование каналов гидравлической связи глубоких горизонтов с дневной поверхностью.

Отчетливой корреляции между значениями коэффициента фильтрации и модуля трещиноватости не отмечается. Корреляцию $К_ф$ с составом пород и трещиноватостью установить сложно, т. к. исследуемые опытно-фильтрационными работами интервалы были большими (до 50 м), и в каждый из них попадали N групп пород (элементов геологического строения) с мощностью m_i и коэффициентом фильтрации k_i. Тогда коэффициент фильтрации скважины M интервала n будет равен:

$$K_f(скважина_M, интервал_n) = \sum_i^N k_i m_i \Big/ \sum_i^N m_i$$

Приведенное выше уравнение — одно из уравнений системы, где неизвестным является коэффициент фильтрации k_i.

Для определения k_i использованы 60 значений $К_ф$, полученных по данным поинтервальных испытаний. Используя различные элементы геологического строения, каждый из которых характеризуется разной степенью трещиноватости, нами была составлена переопределенная система уравнений, для решенная которой был

Таблица 3. Коэффициенты фильтрации элементов геологического строения по результатам решения оптимизационной задачи

Элемент геологического строения	Модуль трещиноватости (M_{mp})		
	<10	10–30	>30
	Коэффициент фильтрации ($n \times 10^{-4}$ м/сут)		
Жилы кварц-полевошпатовые	8,0	н. д.	н. д.
Трахидолериты	3,0	15,0	н. д.
Метадолериты	8,0	15,0	19,0
Граниты пегматоидные	н. д.	11,0	н. д.
Гранито-гнейсы	0,34	н. д.	н. д.
Ортоамфиболиты	н. д.	н. д.	990,0
Плагиогнейсы, гнейсы биотитовые,	9,9	75,0	200,0
Плагиогнейсы биотит-кордиеритовые	9,0	16,0	н. д.
Переслаивание гнейсов	8,0	9,0	н. д.
Гнейсы гранат-биотитовые	3,0	7,0	н. д.
Сланцы кристаллические	5,0	н. д.	н. д.
Переслаивание кристаллических сланцев	н. д.	5,0	н. д.

н. д. – нет данных

применен метод нелинейной оптимизации. По результатам решения оптимизационной задачи на основе имеющихся данных получено 19 значений k_i (табл. 3).

Для установления направления миграции радионуклидов важное значение имеют представления о структуре фильтрационного потока. По результатам проведенной нами обработки результатов пакерных исследований, в скважинах устанавливается различное распределение направлений и скорости фильтрации: сложное знакопеременное (скв. Р-2, 10); связанное преимущественно с горизонтальным течением (скв. Р-3, 4, 6); связанное с восходящим течением (скв. Р-1, 5, 7, 8 , 9, 12).

Результаты измерений уровня подземных вод показывают наличие сложной гидравлической связи между отдельными блоками участка. Анализ распределения средних значений напоров и данные поинтервальных измерений позволил нам построить гидрогеологическую карту для горизонта –70 м и отразить распределение напоров на продольном геолого-гидрогеологическом разрезе (рис. 6). Полученные результаты показывают, что направление потока подземных вод коррелирует с простиранием основных тектонических структур участка, ориентировано в плане на северо-северо-восток, а его разгрузка приурочена к локальной дрене — р. Шумиха. От общего направления потока зафиксировано одно отклонение на северо-запад, в направлении разлома Безымянный. Это связано со структурной неоднородностью фильтрационных свойств пород, которую необходимо учитывать при проведении дальнейших исследований.

Ранее к близким выводам пришел А. Ю. Озерский, показавший, что фильтрация подземных вод в пределах гидрогеологического массива связана в основном с ее перемещениями по трещинам, а их латеральное движение на горизонте 0 м осуществляется в направлении как на северо-северо-восток, в сторону местной дрены, так и на запад — в сторону региональной дрены, русла Енисея [23].

На разрезе, южнее скв. Р-9, напоры подземных вод не приводятся (рис. 6), что связано с отсутствием данных, характеризующих здесь распределение напоров по вертикали. Очевидно, что в этой части площади необходимо проведение дополнительных исследований. Это позволит обосновать краевые условия на южной границе будущих прогнозных геомиграционных моделей.

Связь фильтрации подземных вод с развитыми в породах дизъюнктивными структурами представляется нам несомненной. Свой вклад в повышение водопроницаемости пород вносят развитые в них зоны выщелачивания, а также участки открытой трещиноватости, существование которых обусловлено, по-видимому, характером современного напряженного состояния породного массива. Для более обоснованного суждения о структуре фильтрационного потока необходимо проведение дополнительных опытно-фильтрационных работ в новых скважинах, расположенных в южной и северной частях

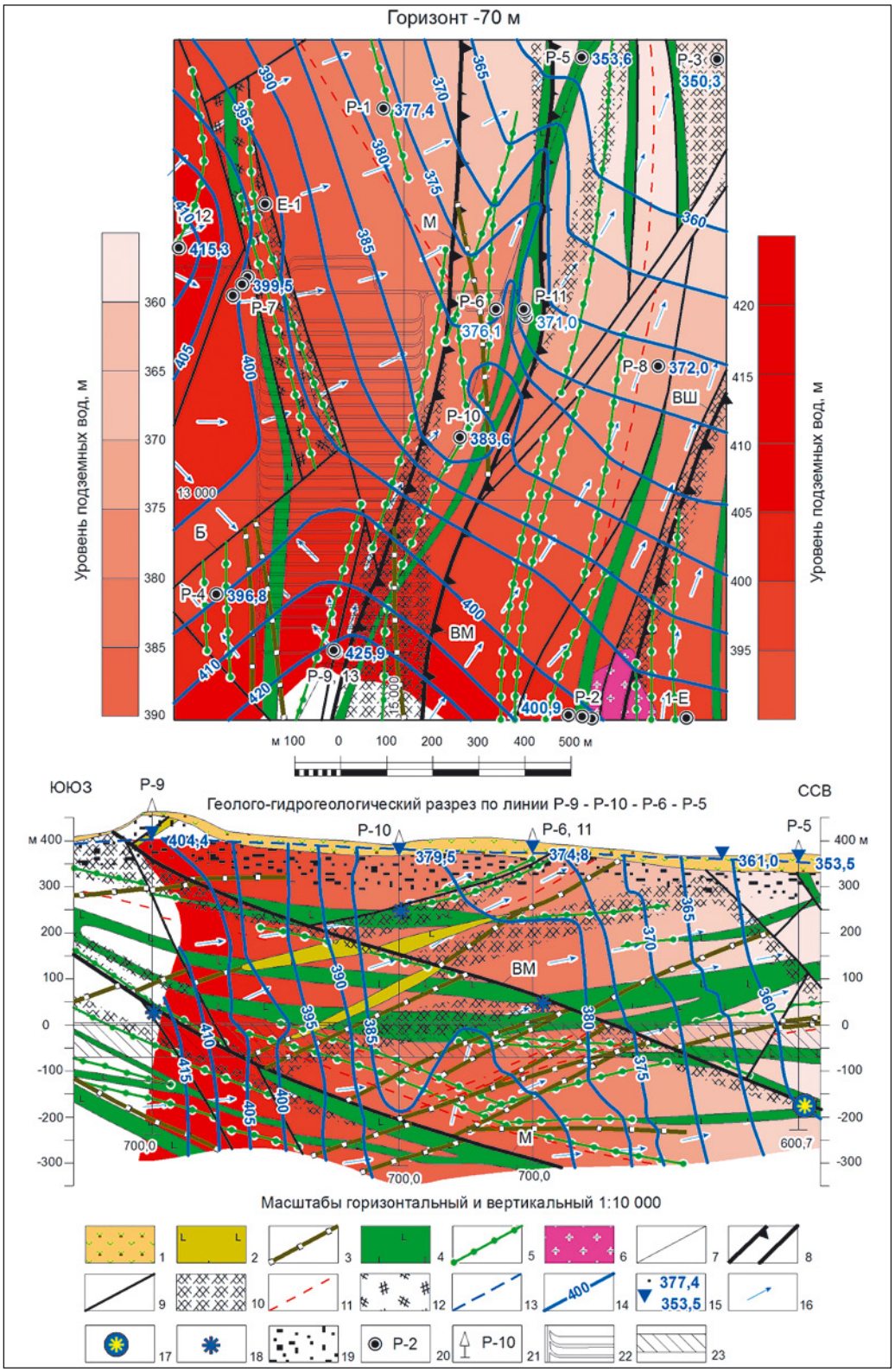

Рис. 6. Геолого-гидрогеологическая карта для горизонта –70 м и геолого-гидрогеологический разрез по линии скв. Р-9–Р-10 – Р-6 – Р-5

1–12 – основные элементы геологического строения: 1 – плиоцен четвертичные отложения нерасчлененные, 2–6 – интрузивные образования в толще гнейсов: 2 – дайки трахидолеритов, 3 – то же вне масштаба, 4 – метадолериты, 5 – то же вне масштаба, 6 – гнейсо-граниты, 7 – геологические границы и линия разреза, 8 – разрывные нарушения главные, 9 – разрывные нарушения второстепенные, 10 – зоны повышенной трещиноватости, 11 – то же внемасштабные, 12 – зоны смятия; 13 – уровень подземных вод; 14 – гидроизопьезы, м; 15 – абсолютные отметки уровня подземных и поверхностных вод, м; 16 – направление потока подземных вод; 17–18 – участки водопритока установленного (17) и предполагаемого (18); 19 – зона приповерхностного окисления пород; 20–21 – буровые скважины на схеме (20) и на разрезе (21); цифры на забое – глубина скважины, м; 22 – контур проектируемого ПГЗРО; 23 – целевой горизонт. Буквами обозначены разломы: Б – Безымянный, ВМ – Верхнемеркурьевский, М – Меркурьевский

участка «Енисейский», модернизация и развитие существующей наблюдательной сети гидрогеологического мониторинга, установление параметров напряженно-деформированного состояния пород на различных глубинах площади участка.

Обсуждение

Анализ первичных материалов и результатов выполненных ранее работ показывает нам, что в геологическом строении участка присутствуют особенности, которые должны быть детально изучены на последующих стадиях. К таким особенностям относятся:

- приуроченность к пограничной зоне региональных тектонических структур, маркирующейся Байкало-Енисейской разломной зоной, отдельные элементы которой несут признаки активизации на четвертичном этапе геологического развития;
- развитие дизъюнктивных структур, представленных зонами дробления, милонитизации, тектоническими брекчиями и разрывами без смещения — трещинами, зонами повышенной трещиноватости, выщелачивания и связанной с ними повышенной водопроницаемостью пород;
- предполагаемое наличие каналов гидравлической связи глубоких горизонтов с дневной поверхностью;
- существование на уровне горизонтов проектируемого сооружения структурно обусловленного восходящего потока подземных вод северо-северо-восточного направления.

Развитие зон дробления, повышенной трещиноватости, интервалов открытой трещиноватости, зон выщелачивания по всей изученной глубине скважин противоречит представлениям об уменьшении трещиноватости пород по мере увеличения глубины и «затухании» разрывных нарушений [3], полном залечивании трещин и отсутствии их сквозного системного характера [24], незначительной роли зон дробления в геологическом строении участка [25] и благоприятности структурно-тектонических характеристик массива в целом [4]. Причина различных представлений о строении участка заключается не столько в наличии неопределенностей в интерпретации геологической информации, обусловленной редкой сетью буровых скважин [14], сколько в полноте использования фактического материала. При этом очевидно, что важно выявление не только активных, но и других тектонических структур, которые испытывают приоткрывание в современном поле напряжений и могут являться одним из путей переноса загрязнения.

Отмеченные выше элементы геологического строения участка могут оказывать отрицательное влияние на безопасность ПГЗРО. Уменьшить такое влияние можно на основе привязки как самой площадки, так и сооружений в ее пределах к реальной геологической структуре, обеспечив размещение объектов вне неблагоприятных гидрогеологических и инженерно-геологических условий. Для этого необходимо осуществить уточнение и дальнейшую детализацию геологических картографических материалов с применением картировочного и разведочного бурения, комплекса геофизических и дополнительных гидрогеологических исследований в новых скважинах с использованием современных методов и оборудования.

В связи с этим весьма актуальными представляются рекомендации ГКЗ «Роснедра», высказанные еще в 2012 г., подтвержденные позднее протоколом ФБУ «ГКЗ» от 03.02.2016, а также замечания экспертизы ФБУ «НТЦ ЯРБ» от 2016 г., направленные на дальнейшее изучение геологического строения участка. Основные рекомендации экспертов сводятся к следующему [26, п. 2.3.3, 2.3.4, 2.3.6; 12, п. 2.2]:

- на площади всего участка «Енисейский» выполнить разведочные работы, в ходе которых провести геологическое картирование и составить карту поверхности участка с целью наиболее точного выявления тектонических нарушений (по мнению авторов статьи, такое картирование на участке разведки необходимо проводить в масштабе не менее 1:2000);
- организовать режимную сеть, которая позволит контролировать подземные воды на различных глубинах;
- выполнить исследование распределения и размеров трещин по глубине с использованием скважинной томографии;
- доизучить взаимосвязь подземных вод в районе полигона захоронения с р. Енисей;
- уточнить значения коэффициентов фильтрации, скорости фильтрации подземных вод по зонам тектонических нарушений в различных гидрогеологических зонах по глубине;
- определить параметры напряженно-деформированного состояния в массиве горных пород по глубине и в плане в естественных условиях, параметры зон трещиноватости и характеристики материалов-заполнителей трещин;
- обосновать оптимальное расстояние между горизонтами ПГЗРО;
- представить отчетные материалы по результатам разведочных работ и опытно-промышленной

эксплуатации полигона захоронения с обоснованием его дальнейшего промышленного освоения в установленном порядке на государственную экспертизу.

В настоящее время отмеченные вопросы остаются невыясненными в связи с фактическим прекращением ведения ГРР. Планирование и проведение разведочных работ являются крайне необходимыми. Авторы статьи явились инициаторами возобновления обсуждения вопроса о проведении ГРР разведочной стадии. Сегодня такие работы планируются ГК «Росатом» в рамках программы научных исследований. Однако они пока не вошли в повестку производственной деятельности недропользователя, от имени которого только и можно их осуществлять. Некоторые геологи [14] предлагают рассматривать «строительство ПИЛ и проведение в ней экспериментов … как следующую (разведочную) стадию геологоразведочных работ» [14].

По нашему мнению, горно-проходческие работы при сооружении ПИЛ не могут заменить разведку участка недр, поскольку имеют другую цель (строительство), осуществляются на ограниченной и очень небольшой (1,7 км^2) площади, не проводятся по разведочной сети обоснованной ориентировки и плотности, не в состоянии обеспечить комплексное (геологическое, геофизическое, гидрогеологическое и др.) изучение участка и выполнить отмеченные выше рекомендации. Разведочная стадия ГРР относится к числу предпроектных [27], предшествующих строительству и эксплуатации подземных сооружений. Кроме того, как утверждает тот же автор [14], до начала строительства необходимо определить значимость существующих неопределенностей в движении подземных вод, т. к. «после начала проходки стволов, которая будет сопровождаться осушением прилегающих пород, гидрогеологические условия в массиве необратимо изменятся» [14]. Наконец, совмещение во времени ГРР и строительства вряд ли оправдано, поскольку их результаты способны изменить локализацию площадки строительства.

Для практического проведения разведочных работ необходима реализация от имени недропользователя хорошо известных мероприятий, установленных [27] и практикой ведения ГРР:

- разработка, экспертиза и утверждение проекта ГРР разведочной стадии в соответствии с нормативными документами [27, 29] и рекомендациями распорядителя недр [12, 26]; выполнение ГРР в соответствии с проектом;
- проведение государственной экспертизы работ и геологическое обоснование выбора площадки размещения ПГЗРО.

Проект ГРР может разрабатываться как в буровом, так и в горно-буровом вариантах [30], но это должен быть проект разведочных, а не строительных работ, направленный на изучение не только ближней, но и дальней зоны будущего хранилища.

В заключение отметим, что современная нормативно-правовая база создания ПГЗРО основывается на двух группах нормативных актов: пользования недрами [27, 30] и обращения с радиоактивными отходами [28, 29 и др.]. Отмеченные группы актов, имеющие различную ведомственную принадлежность, не противоречат, а дополняют друг друга. Однако обе группы имеют недостатки, связанные с отсутствием действующих в России объектов-аналогов, опыта их создания и эксплуатации. Не останавливаясь здесь на их перечислении, отметим актуальность разработки межведомственного документа, в котором были бы учтены и развиты как положения Методических рекомендаций МПР РФ, так и Федеральных норм и правил Госгортехнадзора. Возможно, это могут быть Методические рекомендации по выбору участка недр для целей глубокого захоронения РАО (по видам РАО) и разработке технико-экономического обоснования его промышленного освоения.

Выводы

1. На основании обобщения и анализа первичных материалов и результатов ранее выполненных работ произведена оценка состояния геологической среды участка. В строении участка присутствуют особенности, которые необходимо учитывать и которые должны быть уточнены в дальнейшей работе.

2. Участок приурочен к зоне сочленения региональных тектонических структур, отдельные элементы которой несут признаки активизации на четвертичном этапе геологического развития. На всем интервале глубин развиты разрывные нарушения. Главными являются разломы Верхнешумихинский, Верхнемеркурьевский и Меркурьевский, два последних являются водоподводящими структурами.

3. Широко развиты тектонические трещины, зоны повышенной трещиноватости, интервалы приоткрытых трещин. В настоящее время породы находятся в состоянии преимущественно горизонтального сжатия и вертикального растяжения, что способствует раскрытию пологозалегающих структур.

4. Отдельные участки разреза характеризуются повышенными значениями коэффициента фильтрации. Они связаны с сериями

маломощных тектонических зон, развития открытых трещин, зонами дробления. На значительной глубине отмечен интервал установленного водопритока, выделены участки предполагаемой повышенной водопроницаемости. Развитие гипергенных минералов указывает на возможность существования каналов гидравлической связи глубоких горизонтов с дневной поверхностью.

5. По результатам решения оптимизационной задачи определены значения коэффициента фильтрации различных геологических элементов. В пределах площадки установлено различное распределение направления и скорости фильтрации. Распределение напоров показывает связь потока подземных вод с тектоническими структурами. Противоречие между предположением о нисходящем потоке подземных вод, приводящим к образованию на большой глубине вторичных гидроксидов, и установлением восходящего потока на площадке проектируемого сооружения является, скорее всего, кажущимся и требует дальнейшего изучения. При проведении дальнейших исследований необходимо учитывать структурную неоднородность фильтрационных свойств пород.

6. Дальнейшее изучение особенностей геологического строения участка в целях безопасного размещения необходимо осуществлять на основе проведения геологоразведочных работ разведочной стадии, направленных на комплексное изучение не только ближней, но и дальней зоны будущего хранилища.

Литература

1. *Андерсон Е. Б., Даценко В. М., Кирко В. И. и др.* Результаты комплексных геологических исследований Нижнеканского массива для обоснования возможности его использования для захоронения отвержденных радиоактивных отходов // Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО: Материалы КНТС. г. Железногорск, 16—20 марта 1998 г., ГХК, НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», СПб, 1999. С. 14—23.

2. *Кринин В. А., Якимов А. М., Музыченко Б. И. и др.* Результаты комплексных геофизических и геохимических работ на Нижнеканском гранитоидном массиве с целью определения геологических объектов для захоронения ядерных отходов // Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО: Материалы КНТС. г. Железногорск, 16—20 марта 1998 г., ГХК, НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», СПб, 1999. С. 44—46.

3. *Кудрявцев Е. Г., Гусаков-Станюкович И. В., Камнев Е. Н., Лобанов Н. Ф., Бейгул В. П.* Федеральный объект подземного захоронения отвержденных радиоактивных отходов в России: практические шаги к созданию // Безопасность окружающей среды. 2008. № 4. С. 106—112.

4. *Лобанов Н. Ф., Бейгул В. П., Лопатин П. В., Озерский А. Ю.* Выбор расположения и обоснование пригодности участка для создания подземной исследовательской лаборатории на Нижнеканском массиве горных пород // Горный журнал. 2015. № 10. С. 59—64.

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. *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.

8. *Линд Э. Н., Беспрозванных А. С.* Комплексные геолого-геофизические исследования участка «Енисейский» Нижнеканского гранитоидного массива / КГУП «КНИИГиМС», Красноярск, 2003.

9. *Софронов А. В., Трофимов В. А., Забродин С. М.* Разработка программы геофизических исследований для доизучения района возможного размещения ПГЗРО (Красноярский край) / АО «ГСПИ», Красноярск, 2017.

10. *Ощепков М. Д., Петров А. В.* Геофизические методы исследования. Площадная магнитная съемка для уточнения геолого-структурных особенностей участка и инженерно-геофизические изыскания / ОАО «ГСПИ» — КПИИ «КНИПИЭТ», ОАО «Красноярскгеология», 2013.

11. Подготовка проектной документации по строительству объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижнеканский массив). Раздел 4. Конструктивные и объемно-планировочные решения. Часть 6. Подземный комплекс. Книга 4. Горизонтальные выработки / М., ОАО «ВНИПИпромтехнологии», 2014.

12. Протокол ГКЗ Роснедра № 4523-пс от 03.02.2016 «Утверждение заключения государственной экспертизы материалов Геологического

доизучения (оценочная стадия) горного массива участка Енисейский для обоснования расширения интервала захоронения радиоактивных отходов до глубин 450—525 м объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижнеканский массив). — М., 2016.
13. *Кочкин Б. Т.* Оценка безопасности геологических хранилищ ВАО и ОЯТ: международный опыт в приложении к Енисейскому проекту // Радиоактивные отходы, № 2 (3), 2018, С. 18—29.
14. *Кочкин Б. Т.* Задачи изучения геологической среды участка Енисейский на текущем этапе проекта захоронения // Радиоактивные отходы, № 2 (7), 2019, С. 76—91.
15. *Парфенов Ю. И., Гончаров Ю. И.* Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Енисейская. Лист O-46-XXXIV. Пояснительная записка. — М., Недра, 1967, 75 с.
16. *Никулов Л. П., Бабкин А. Н., Колямкин В. М. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:2 000 000. Издание второе. Енисейская серия. Лист O-46-XXXIV (Сосновоборск). Пояснительная записка. — М., СПб, 2001, 249 с.
17. *Качевский Л. К., Зуев В. К.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист O-46 — Красноярск. — СПб, ВСЕГЕИ, 2005.
18. *Зуев В. К., Качевский Л. К., Качевская Г. И. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист O-46 — Красноярск. Пояснительная записка. — СПб, ВСЕГЕИ, 2009, 500 с.
19. *Лобацкая Р. М.* Неотектоническая разломно-блоковая структура зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 12. С. 141—150.
20. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист O-46 (47) — Красноярск. Объяснительная записка / Ковригина Е. К. (отв. ред.). — ВСЕГЕИ, Л-д, 1978, 167 с.
21. *Кочкин Б. Т., Мальковский В. И., Юдинцев С. В.* Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). М., ИГЕМ РАН, 2017, 384 с.
22. *Василевская Л. С., Савич А. И.* Оценка напряженного состояния горных пород Нижнеканского массива на участке «Енисейский» ультразвуковым методом / ООО «Центр геодинамических исследований». — М., 2010.
23. *Озерский А. Ю.* Особенности фильтрации подземных вод в массиве кристаллических пород в южной части Енисейского кряжа // Комплексные проблемы гидрогеологии: Тез. докл. науч. конф. — Санкт-Петербург, Россия, 23—25 октября 2013 г. — СПб: Санкт-Петербургский гос. ун-т, 2013. С. 110—113.
24. *Лобанов Н. Ф., Бейгул В. П., Камнев Е. Н., Лопатин П. В., Ревенко Ю. А., Шрамко И. В.* Федеральный объект окончательной подземной изоляции долгоживущих РАО на Горно-химическом комбинате // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2011. № 1. С. 18—24.
25. *Румынин В. Г., Никуленков А. М.* Разработка структурной модели трещиноватого пространства Нижне-Канского геологического массива (участок «Енисейский»). СПбО ИГЭ РАН, СПб, 2016.
26. Протокол ГКЗ Роснедра № 2755-пс от 13.04.2012 «Государственная экспертиза материалов «Геологические исследования (оценочная стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижнеканском массиве (участок Енисейский). М., 2012.
27. Методические рекомендации по обоснованию выбора участков недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых. М., ГКЗ, 2007, 36 с.
28. НП-100-17. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов. М., Ростехнадзор, 2017. 122 с.
29. НП-055-14. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. М., Ростехнадзор, 2014, 54 с.
30. Положение о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям (твердые полезные ископаемые). Утверждено Распоряжением Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 5 июля 1999 года № 83-р.

Сведения об авторах

Морозов Олег Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (115191, Москва, ул. Большая Тульская, 52), e-mail: oam55@yandex.ru.

Расторгуев Александр Владилинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (115191, Москва, ул. Большая Тульская, 52), e-mail: alvr9@mail.ru.

Неуважаев Георгий Дмитриевич, младший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (115191, Москва, ул. Большая Тульская, 52), e-mail: gogen92@mail.ru.

Библиографическое описание статьи

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. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.

ASSESSING THE STATE OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT AT THE YENISEYSKIY SITE (KRASNOYARSK REGION)

Morozov O. A., Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on December 2, 2019

The paper discusses the main features of the Yeniseyskiy site, being considered for deep radioactive waste disposal facility construction, in terms of its geological structure. Elements of 3D-geological model were built in Micromine environment and geological risk factors required to be taken into account during the development of safety assessment models were identified. The paper examines the connection between groundwater filtration and relevant disjunctive structures. It is noted that risk minimization is possible based on geological exploration conducted at the exploration stage.

Keywords: *radioactive waste, deep disposal of radioactive waste, geological and hydrogeological studies, geological exploration, safety.*

References

1. Anderson E. B., Datsenko V. M., Kirko V. I. et al. *Rezultaty komleksnykh geologicheskich issledovanyi Nizhnekanskogo massiva dlya obosnovaniya vozmozhnosty ego ispolzovaniya dlya zakhoroneniya otverzhdennyh radioaktivnyh othodov* [The results of comprehensive geological studies of Nizhnekansky massif to substantiate the possibility of its use for disposal of solidified radioactive waste]. In the book: Studies of Nizhnekansky massif granitoids for the disposal of radioactive waste. Radium Institute by V. G. Khlopin, St. Petersburg, 1999, pp. 14—23.

2. Krinin V. A., Yakimov A. M., Muzychenko B. I., et al. *Rezultaty kompleksnyh geophyzycheskyh i geokhymicheskyh rabot na Nizhnekanskom granitoidnom massive s tcelyu opredeleniya geologicheskih obektov dlya zakhoroneniya radioaktivnyh othodov* [The results of complex geophysical and geochemical works on Nizhnekansky granitoid massif with the aim of identifying geological sites for disposal of nuclear waste]. In the book: Studies of Nizhnekansky massif granitoids for the disposal of radioactive waste. Radium Institute by V. G. Khlopin, St. Petersburg, 1999, pp. 44—46.

3. Kudryavtsev E. G., Gusakov-Stanyukovich I. V., Kamnev E. N., Lobanov N. F., Beigul V. P. Federalnyi obekt podzemnogo zakhoroneniya otverzhdennyh radioaktivnyh othodov v Rossyi: prakticheskie shagi k sozdaniyu [Federal facility for underground disposal of solidified radioactive waste in Russia: practical steps to creation]. *Bezopasnost' okruzhayushchej sredy — Environmental Safety,* 2008, no.4, pp. 106—112.

4. Lobanov N. F., Beigul V. P., Lopatin P. V., Ozersky A. Yu. Vybor raspolozheniya i obosnovanie prigodnosti uchastka dlya sozdaniya podzemnoi issledovanelskoi laboratorii na Nizhnekanskom massive gornyh porod [Select the location and justification of the suitability of the site for the creation of underground research laboratories on Nizhnekansky rocks massif]. *Gornyj zhurnal — Mining journal,* 2015, no. 10, pp. 59—64.

5. Ozersky A. Yu., Zablotsky K. A. *Geologicheskie issledovaniya (poiskovaya stadiya) obekta okonchatelnoi 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 isolation of radioactive waste in Nizhnekansky massif (the Yenisei site)]. Krasnoyarsk, JSC "Krasnoyarsk Geology", 2011.

7. Karaulov A. V., Zablotsky K. A. *Geologicheskoe doizuchenie (otsenochnaya stadia) gornogo massiva uchastka Eniseiskyi dlya obosnovaniya rasshireniya intervala zakhoroneniya radioaktivnyh othodov do glubin 450—525 m obectov okonchatelnoi izolyatsyi radioaktivnyh othodov (Krasnoyarskyi krai, Nizhne-Kanskyi massiv)* [Geological study (evaluation stage) of Yenisei 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.

8. Lind E. N., Besprozvannyh A. S. *Kompleksnye geologo-geofizicheskie issledovaniya uchastka Eniseiskyi Nizhnekanskogo granitoidnogo massiva* [Integrated geological and geophysical studies of the Yenisei site on Nizhnekansky granitoid massif], Krasnoyarsk, 2003.

9. Sofronov A. V., Trofimov V. A., Zabrodin S. M. *Razrabotka programmy geofizicheskih issledovanyi dlya doizucheniya raiona vozmozhnogo razmesheniya PGZRO (Krasnoyarskyi krai)* [Development of geophysical investigations program for exploring of area for possible underground disposal of radioactive waste (Krasnoyarsk region)]. Krasnoyarsk, JSC "GSPI", 2017.

10. Oshchepkov M. D., Petrov A. V. *Geofizicheskie metody issledovaniya. Ploshadnaya magnitnaya syemka dlya utochneniya geologo-strukturnyh osobennostei uchastka i inzhenerno-geofizicheskie izyskaniya* [Geophysical research methods. Areal magnetic survey to clarify the geological and structural features of the site and engineering-geophysical surveys]. Krasnoyarsk, JSC "Krasnoyarsk Geology", 2013.

11. Podgotovka proektnoi dokumentatsyi po stroitelstvu obektov okonchatelnoi izolyatsyi radioaktivnyh othodov [Preparation of project documentation for the construction of facilities for the final isolation of radioactive waste (Krasnoyarsk region, Nizhne-Kansk massif)]. Section 4. Structural and space-planning solutions. Part 6. Underground complex. Book 4. Horizontal workings. Moscow, JSC "Vnipipromtechnologii", 2014.

12. Protokol GKZ Rosnedra № 4523-ps ot 03.02.2016 Utverzhdenie zaklyucheniya gosudarstvennoi ekspertizy materialov Geologicheskogo doizucheniya (otsenochnaya stadiya) gornogo massiva uchastka Eniseiskyi dlya obosnovaniya rasshireniya intervala zahoroneniya radioaktivnyh othodov do glubin 450—525 m obectov okonchatelnoi izolyatsyi radioaktivnyh othodov (Krasnoyarskyi krai, Nizhne-Kanskyi massiv) [Protocol of State Committee of Reserves No. 4523-ps from 03.02.2016. Approval of the conclusion of state examination of Geological materials (evaluation stage) of the rocks massif of the Yenisei site to justify the extension of the interval of the disposal of radioactive waste to depths of 450—525 m of objects for final isolation of radioactive waste (Krasnoyarsk region, Nizhne-Kansky massif)]. Moscow, 2016.

13. Kochkin B. T. Otcenka bezopasnosti geologicheskih khranilish VAO I OYAT: mezhdunarodnyi opyt v prilozhenii k Eniseiskomu proektu [Safety assessment of geological storage facilities of high-activity waste and work-out nuclear fuel: international experience in the application to the Yenisei project]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste,* no. 2 (3), 2018, pp. 18—29.

14. Kochkin B. T. Zadachi izucheniya geologicheskoi sredy uchastka Eniseskyi na tekyshem etape proekta zakhoroneniya [Tasks of studying the geological environment of the Yenisei site at the current stage of the burial project]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste,* no. 2 (7), 2019, pp. 76—91.

15. Parfenov Yu. I., Goncharov Yu. I. *Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200000. Seria Eniseiskaya. List O-46-XXXIV. Poyasnitelnaya zapiska* [Geological map of the USSR scale 1:200 000. Series of the Yenisei. Sheet O-46-XXXIV. Explanatory note]. Moscow, Nedra Publ., 1967, 75 p.

16. Nikulov L. P., Babkin A. N., Kolyamkin V. M., et al. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossyiskoi Federatsyi masshtaba 1:200000. Izdanie vtoroe. Eniseiskaya seria. List O-46-XXXIV (Sosnovoborsk). Poyasnitelnaya zapiska.* [State geological map of the Russian Federation scale 1:200000. Second edition. Yenisei series. Sheet O-46-XXXIV (Sosnovoborsk). Explanatory note]. Moscow, St. Petersburg, 2001, 249 p.

17. Kachevsky L. K., Zuev V. K. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossyiskoi Federatsyi. Masshtab 1:1000000 (tretie pokolenie). Seria Angaro-Eniseiskaya. List O-46 — Krasnoyarsk* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Angaro-Yenisei Series. Sheet O-46-Krasnoyarsk]. St. Petersburg, VSEGEI, 2005.

18. Zuev V. K., Kachevskij L. K., Kachevskaya G. I. et al. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossyiskoi Federatsyi. Masshtab 1:1000000 (tretie pokolenie). Seria Angaro-Eniseiskaya. List O-46 — Krasnoyarsk. Poyasnitelnaya zapiska.* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Angaro-Yenisei Series. Sheet O-46–Krasnoyarsk]. Explanatory note. St. Petersburg, VSEGEI, 2009, 500 p.

19. Lobatskaya R. M. Neotektonicheskaya razlomno-blokovaya struktura zony sochleneniya Sibirskoi platformy i Zapadno-Sibirskoi plity [Neotectonic

fault-block structure of the junction zone of the Siberian platform and the West Siberian plate]. *Geologiya i geofizika — Geology and Geophysics,* 2005, vol. 46, no. 12, pp. 141—150.
20. Kovrigina E. K. (resp. ed.) *Geologicheskaya karta SSSR. Masshtab 1:1000000 (novaya seriya). List O-46 (47) — Krasnoyarsk. Poyasnitelnaya zapiska.* [Geological map of the USSR. Scale 1:1000000 (new series). Sheet O-46 (47) — Krasnoyarsk. Explanatory note]. Leningrad, VSEGEI, 1978, 167 p.
21. Kochkin B. T., Malkovsky V. I., Yudintsev S. V. *Nauchnye osnovy otsenki bezopasnosti geologicheskoi izolyatsii dolgozhivushikh radioaktivnykh othodov (Eniseiskyi proekt)* [Scientific bases of safety assessment of geological isolation of long-lived radioactive waste (Yenisei project)]. Moscow, IGEM RAS, 2017, 384 p.
22. Vasilevskaya L. S., Savich A. I. *Otsenka napryazhennogo sostoyaniya gornyh porod Nizhnekanskogo massiva na uchastke Eniseiskyi ultrazvukovym metodom* [Evaluation of the stress state of rocks of Nizhnekansky massif on the site «Yenisei» by ultrasonic method]. Moscow, LLC «Center of geodynamical researches», 2010.
23. Ozersky A. Yu. Osobennosti filtratsyi podzemnyh vod v massive kristallicheskih porod v yuzhnoi chasti Eniseiskogo kryazha [Features of groundwater filtration in crystalline rock massif in the southern part of the Yenisei ridge]. *Tez. dokl. nauch. konf. "Kompleksnye problemy gidrogeologii"* [Abstr. of Sci. Conf. "Complex problems of hydrogeology"]. St. Petersburg, St. Petersburg State University Publ., 2013, pp. 110—113.
24. Lobanov N. F., Beigul V. P., Kamnev E. N., Lopatin P. V., Revenko Yu. A., Shramko I. V. Federalnyi obekt okonchatelnoi podzemnoi izolyatsii dolgozhivushih RAO na Gorno-khimicheskom kombinate [Federal object of final underground isolation of long-lived radioactive waste at the Mining and chemical plant]. *Bezopasnost' yadernyh tekhnologij i okruzhayushchej sredy — Nuclear and Environment Safety,* 2011, no. 1, pp. 18—24.
25. Rumynin V. G., Nikulenkov A. M. *Razrabotka strukturnoi modeli treshinovatogo prostranstva Nizhne-Kanskogo geologicheskogo massiva (uchastok Eniseiskyi)* [Development of a structural model of the fractured space of the lower Kansk geological massif (Yenisei site)]. SpbB IGE RAS, St. Petersburg, 2016.
26. Protokol GKZ Rosnedra № 2755-ps ot 13.04.2012 Gosudarstvennaya ekspertiza materialov «Geologicheskie issledovaniya (otsenochnaya stadiya) obekta okonchatelnoi izolyatsyi radioaktivnyh othodov na Nizhne-Kanskom massive (uchastok Eniseiskyi)» [Protocol of State Committee of Reserves No. 2755-ps of 13.04.2012. State examination of materials «Geological studies (evaluation stage) of the object for final isolation of radioactive waste in the Nizhne-Kansky massif (Yenisei site)»]. Moscow, 2012.
27. Metodicheskie rekomendatsyi po obosnovaniyu vybora uchastkov nedr dlya tselei, ne svyazannyh s dobychei poleznyh iskopaemyh [Methodological recommendations for the justification of the choice of subsurface areas for purposes not related to mining]. Moscow, GKZ Publ., 2007, 36 p.
28. NP-100-17. Treboniya k sosnavu i soderzhaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti punktov zahoroneniya radioaktivnyh othodov [Requirements for the composition and content of the report on the safety justification of radioactive waste disposal points]. Moscow, Rostekhnadzor Publ., 2017, 122 p.
29. NP-055-14. Zahoronenie radioaktivnyh othodov. Printsipy, kriteryi i osnovnye trebovaniya bezopasnosti [Radioactive waste disposal. Principles, criteria and basic safety requirements]. Moscow, Rostekhnadzor Publ., 2014, 29 p.
30. Polozhenie o poryadke provedenia geologorazvedochnyh rabot po etapam i stadiyam [Regulations on the procedure of geological exploration by stages and stages (solid minerals). Approved by the Order of the Ministry of natural resources of the Russian Federation of July 5, 1999 N 83-p].

Information about the authors

Morozov Oleg Antolievich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya, Moscow, 115191, Russia), e-mail: oam55@yandex.ru.

Rastorguev Alexander Vladilinovich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya, Moscow, 115191, Russia), e-mail: alvr9@mail.ru.

Neuvazhaev Georgy Dmitrievich, Junior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya, Moscow, 115191, Russia), e-mail: gogen92@mail.ru.

Bibliographic description

Morozov O. A., Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D. Assessing the State of the Geological Environment at the Yeniseyskiy Site (Krasnoyarsk Region). *Radioactive Waste,* 2019, no. 4 (9), pp. 46—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62. (In Russian).