Захоронение РАО

УДК 621.039.75

ПОДЗЕМНАЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ: ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКЕ АСПЕКТЫ БЕЗОПАСНОСТИ

В. Н. Морозов, В. Н. Татаринов, В. И. Кафтан, А. И. Маневич Геофизический центр РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 22 мая 2018 г.

В статье рассмотрены геодинамические и сейсмотектонические аспекты геоэкологической безопасности подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов на участке Енисейский Нижнеканского массива. Выявление активных тектонических нарушений и изучение их кинематических особенностей является важнейшей задачей геомеханических исследований. Анализ результатов инструментальных наблюдений за современными движениями земной коры показал, что максимальные скорости деформаций в аномальных участках не превышают 5·10⁻⁷ год⁻¹. Наличие в переделах участка границы деформаций сжатия и растяжения указывает на необходимость более детального изучения геодинамики и сейсмотектоники участка Енисейский и прилегающих районов в рамках комплексных исследований в ПИЛ. В зонах концентрации напряжений при проходке горных выработок ПИЛ возможно разрушение хрупких пород в динамической форме. Этот вопрос требует детальной проработки на стадии подготовительных горных работ при строительстве пункта глубинного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов.

Ключевые слова: высокоактивные радиоактивные отходы, подземная исследовательская лаборатория, геодинамика, современные движения земной коры, глобальные навигационные спутниковые системы, активные разломы.

Введение

Мировая практика создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) предусматривает на начальном этапе строительство подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). В настоящее время исследования в ПИЛ проводятся в 27 странах: в солях (Германия, США), гранитах (Швеция, Финляндия, Швейцария, Канада, Россия), глинах (Франция, Швейцария, Бельгия), туфах (США) и др. В России в 2018 г. начинается строительство ПИЛ в гранитогнейсовых породах Нижнеканского массива. Предполагается, что полученные в ПИЛ знания будут содействовать принятию окончательного решения о пригодности участка Енисейский для захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (ВАО).

Российская концепция безопасности подземной изоляции ВАО основана на том, что главным барьером на пути миграции радионуклидов является геологическая среда. Создание крупномасштабного подземного сооружения размерами ~ 1,5×1,0 км на глубине 500—600 м с объемом извлеченной массы пород порядка 10 млн м³ в районе активного орогенеза требует всесторонней оценки безопасности как при строительстве ПИЛ, так и при возможной эксплуатации ПГЗРО. Прогноз изоляционных свойств породного массива в ближней и дальней зонах ПГЗРО, оценка приемлемого риска, включая безопасность ведения горных работ, является фундаментальной задачей геодинамических и сейсмотектонических исследований в данной проблеме.

Разломная тектоника, тектонические напряжения, сейсмичность являются определяющими факторами, обуславливающими разномасштабную деструкцию породных массивов. Теоретические оценки воздействия тепловыделения ВАО в диапазоне температур 100-150 °С в течение 300-400 лет дают основание полагать, что термонапряжения не смогут достигнуть критических для горных пород значений. Но даже при таких температурах, существуют мнения, что время сохранности системы инженерных барьеров (СИБ) не превысит 3-3,5 тыс. лет [21]. Поскольку срок безопасного функционирования СИБ мал по сравнению с периодом радиобиологической опасности ВАО, превышающем 10 тыс. лет, то конструктивные особенности, технология проходки выработок ПГЗРО и параметры СИБ должны быть выбраны при проектировании таким образом, чтобы минимально нарушить существующие естественные изоляционные свойства геологического барьера [9].

В этой связи *структурно-тектоническая нарушенность* (разломы, крупные трещины) геологической среды и ее *подвижность* (тектонический крип и сейсмичность) под действием изменяющихся во времени тектонических напряжений на участке Енисейский и прилегающих районах являются фундаментальными факторами, определяющими изоляционные свойства пород в ближней и дальней зонах ПГЗРО. От них также зависит безопасность ведения горных работ (горные удары) и устойчивость приконтурных зон шахтных стволов и горных выработок.

В последние годы были получены новые данные о современных движениях земной коры (СДЗК) в северной части Нижнеканского массива на основе методов космической геодезии и повторного нивелирования. В этой связи появилась возможность построения более достоверных геодинамических моделей эволюции геологической среды и прогноза сейсмотектонических условий на участке Енисейский.

Структурно-тектонические условия участка Енисейский

Нижнеканский массив находится в зоне активного орогенеза, т. е. процесс его формирования как горного сооружения еще не закончен. Он расположен в узле сочленения трех крупных тектонических структур — Сибирской платформы, Западно-Сибирской плиты и Алтае-Саянской орогенной области, и его современное напряженное состояние определяется их тектоническим взаимодействием. Участок Енисейский располагается на западной границе Нижнеканского гранитоидного массива и вмещающих его докембрийских толщ гнейсов. Такие зоны экзоконтактов магматических тел, как правило, отличаются повышенной трещиноватостью и структурной неоднородностью. Породы представлены также многочисленными дайками метаморфизованных магматических пород основного состава [1].

Тектоническая позиция участка Енисейский (рис. 1) достаточно противоречивая [1]. Его восточный край отсекается древним Правобережным разломом сбросового характера. Этот разлом формирует северо-восточный склон Атамановского хребта. Максимальная амплитуда сброса, по данным Н. В. Лукиной, составляет 400—580 м при длине около 20 км [2]. Амплитуда послеюрского смещения оценивается в 300 м. Разлом был подновлен на новейшем этапе - активен в голоцене и в настоящее время. Об этом свидетельствуют данные повторного высокоточного геодезического нивелирования, согласно которым современные движения по разлому составляют 1 мм/год [2]. Ширина зоны динамического влияния Правобережного разлома (его также называют Тельский) варьирует от 300 м до 3 км. Перпендикулярно к нему расположен Шумихинский сдвиг, отделяющий пониженный структурный блок от центральной части участка. Таким образом, эти два разрывных нарушения делят участок Енисейский на три разновысотных структурных блока.

Помимо названных, при анализе морфологических особенностей рельефа [1] имеют четкое выражение и более мелкие разломы и трещины, а в 2—3 км к западу от границы участка проходит активный Муратовский разлом, который считается современной границей Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты. При этом плита опускается, а платформа медленно вздымается. Суммарная амплитуда вертикальных смещений по разлому превышает 3 мм/год. Это подтверждается результатами наблюдений на геодинамическом полигоне с использованием спутниковых навигационных систем [19, 27].

По результатам геофизических исследований в пределах участка был выделен устойчивый и относительно однородный блок (рис. 1) [7] в центральной части Байкало-Шумихинской площади (к северу от излучины р. Байкал) размером 2,0×2,5 км и вертикальной мощностью более 4 км, в пределах которого и планируется размещение ПГЗРО. Геологическое строение участка детально изучено в 2001—2011 гг. бурением скважин глубиной до 700 м и геофизическими методами.

Имеются данные [10], что в верхней части земной коры существуют локальные поля тектонических напряжений, обусловленные деформацией осадочных слоев над дифференцированно перемещающимися блоками кристаллического фундамента, под воздействием глобальных полей тектонических напряжений. При этом над разломом фундамента образуется зона его динамического влияния, подобная областям в крыльях разломов. Вдоль оси этой зоны изза максимальной концентрации напряжений



Рис. 1. Тектоническая схема (по материалам геологического картирования, результатов геофизических исследований, 2004 г.) [7] и геологическое строение (карта Морозова О. А., 2018 г.) участка Енисейский

породы испытывают динамическое уплотнение (над взбросо-сдвигом) или разуплотнение (над сбросо-сдвигом), благодаря чему проницаемость массива может существенно меняться [12]. В принципе, такой вариант развития ситуации нельзя исключать и на участке Енисейский. Несмотря на то, что в верхней его части осадочный чехол слабо развит, но учитывая новейшие положительные вертикальные движения в этой части Енисейского кряжа [27], образование аналогичных зон растяжения в зоне ПГЗРО вполне вероятно.

В работе [1] нами подчеркивалось, что «долговременное подземное хранение ВАО возможно только вне объемов зон динамического влияния активных разломов». Этот тезис перенесен в действующие нормы и правила, регулирующие оценку исходной сейсмичности при размещении объектов использования атомной энергии [22]. Вместе с тем осознание неопределенности при оценке размеров зон влияния тектонических разломов требует постановки детальных исследований в привязке к конкретным горно-геологическим условиям ПГЗРО.

Известно, что размеры зоны влияния разломов зависят от их протяженности. В пределах Нижнеканского массива наиболее молодые разломы имеют максимальную ширину зон динамического влияния. Так, например, для Малого Итатского разлома ширина зоны динамического влияния на поднятом крыле составляет 1,3 км, а на опущенном — 1,15 км [9]. Ширина зон влияния разломов в зависимости от длины (L) определяется следующим соотношением

$$H = k L. \tag{1}$$

Величина коэффициента k в среднем составляет 0,05, но в некоторых случаях достигает 0,08—0,1 [1]. Таким образом, из этого соотношения, подземные выработки ПИЛ и ПГЗРО могут оказаться в зоне тектонического крипа





Рис. 2. Поперечный профиль через Нижнеканский массив (вертикальный масштаб сильно увеличен), красным цветом показаны активные разломы, черным пунктиром зона динамического влияния разломов

Атамановского разлома на западе и Правобережного на востоке (рис. 2).

По данным инструментальных наблюдений (см. следующий раздел), относительные перемещения блоковых структур (рис. 2) приводят к межблоковой деструкции и увеличению размеров зоны динамического влияния разломов.

Таким образом, выявление активных тектонических нарушений и исследование их кинематических особенностей в пределах участка Енисейский и прилежащих районах является важнейшей задачей геомеханических исследований в ПИЛ. Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что исследования в ПИЛ будут эффективны, если они будут проводится одновременно и в тесной увязке с геодинамическими наблюдениями за СДЗК на земной поверхности, охватывающими все близлежащие тектонические нарушения, и системном анализе всех имеющихся геолого-геофизических данных [3, 4].

Результаты инструментальных наблюдений за кинематикой северо-западной части Нижнеканского массива

Важнейшее место в решении задач прогноза сохранности изоляционных свойств породных массивов в ближней и дальней зонах ПГЗРО занимают наблюдения за вертикальными и горизонтальными компонентами СДЗК.

В интервале времени с 1980 по 2012 гг. на севере Нижнеканского массива различными организациями было выполнено несколько циклов наблюдений за вертикальной компонентой СДЗК методом высокоточного повторного нивелирования, а в 2007—2016 годах Геофизическим центром РАН проводились наблюдения за горизонтальными компонентами СДЗК с использованием спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС.

Интегральные результаты повторного нивелирования, приведенные в различных отчетах, сводятся к двум тезисам:

- скорости вертикальных СДЗК в районе исследования не превышают 2,5 мм/год;
- имеется разброс скоростей вертикальных СДЗК, установленный исследователями в различные периоды, от 0,1 до 2,5 мм/год, что, вероятно, связано с цикличностью геодинамических движений.

В 2012—2015 гг. сотрудниками ООО «Геолком» в рамках работ по обоснованию безопасности объектов цеха № 1 ИХЗ ФГУП «ГХК» были возобновлены наблюдения методом высокоточного повторного нивелирования. Всего было проведено 4 цикла наблюдений. На рис. 3 приведена карта с нанесенными пунктами наблюдений за СДЗК методами космической геодезии и профиль № 1 высокоточного повторного нивелирования.

Рассмотрим вначале данные о вертикальной компоненте СДЗК. Геодинамический профиль № 1 представляет собой линию высокоточного нивелирования, проходящую с запада от воскрыла Минжуль-Сидельниковского точного сброса на восток — до восточного крыла Большетельского сброса [2]. Общая фактическая протяженность нивелирного хода 45 км. В составе профиля оборудовано 34 знака, в том числе 16 грунтовых реперов, 11 глубинных реперов, 2 стенных репера, 3 оголовка геологических скважин и 2 обсадных колонны геологических скважин. Начало и конец нивелирного хода закреплены кустами из трех реперов и одного гравиметрического пункта.

Наиболее интересные результаты были получены по участку профиля № 1 (рис. 4) от Правобережного до Муратовского разлома. Всего по профилю № 1 измерения были выполнены 7 раз: нулевой цикл в 2002 году и затем с 2006 по 2015 годы еще 6 циклов. Превышения между пунктами наблюдательной сети при нивелировании 1 класса точности были определены с ошибкой, не превышающей ± 0,7 мм/км. Оценка вертикальных СДЗК проводилась путем сопоставления превышений между начальным репером *Rp* 24 профиля в районе Правобережного разлома и реперами по профилю (рис. 5). Пункты *Rp* 26 и *Rp* 0197 расположены на западном крыле Правобережного тектонического нарушения в пределах блока, ограниченного Правобережным и Атамановским тектоническими нарушениями, при этом пункты располагаются на периферических частях блока: *Rp* 26 — на восточной окраине блока, в непосредственной близости от Правобережного разлома, а *Rp* 0197 — на западной окраине близ Атамановского разлома.

Захоронение РАО



Рис. 3. Карта района исследований. Черным пунктиром показан профиль высокоточного повторного нивелирования, треугольники — пункты ГНСС-наблюдений. Красные линии — основные тектонические нарушения



Рис. 4. Графики изменения превышений реперных пунктов по данным нивелирования 1 класса за 2002—2015 гг. по профилю № 1 [2, 17]

Измеренные при нивелировании величины вертикальных движений структурных блоков носят, как правило, разнонаправленный характер. Закономерных однонаправленных движений, по величине значительно превосходящих точность измерений, за период наблюдений с 1990 по 2015 годы не зафиксировано. По ряду тектонических нарушений и разделяемых ими тектонических блоков отмечается наличие трендов, проявляющихся в закономерном вертикальном смещении блоков в многолетнем разрезе, но с амплитудами меньшими, чем точность измерения [2].

Из рис. 5 видно, что наблюдательные пункты *Rp* 26 и *Rp* 0197, а значит и структурный блок в целом, испытывали разнонаправленные



Рис. 5. Графики вертикальных перемещений репера Rp 26 (а) и репера Rp 0197 (б) относительно репера Rp 24 [17]

вертикальные движения относительно пункта *Rp* 24, расположенного на восточном крыле Правобережного разлома. И в том и в другом случае преобладали периоды опускания, на фоне которых отмечаются периоды поднятия разной продолжительности. Однако четкий тренд за период с 2002 по 2015 годы указывает на опускание западного крыла Правобережного разлома относительно восточного с суммарной амплитудой около 5 мм за тринадцать лет, то есть в среднем для блока на 0,4 мм/год. Далее на запад по профилю № 1 в 2002-2006 гг. отмечается незначительное опускание западного крыла блока (*Rp* 0197), ограниченного с востока Правобережным и с запада Атамановским нарушениями, относительно восточного крыла блока (*Rp* 26), а в интервале времени 2006-2011 гг. наоборот поднятие, в 2011-2015 гг. наблюдается опять опускание западного крыла.

Необходимо также отметить принципиальное совпадение амплитуды и направленности движений, зафиксированных по указанным реперам. Таким образом, с 2002 по 2015 годы можно выделить два периода. Период подъема продолжался девять лет, с 2002 по 2011 гг., суммарная амплитуда подъема блока составила 6—7 мм. После 2011 года наступил период разнонаправленных движений, выразившихся в опускании блока на 7—8 мм за три года и последующем подъеме на 1—3 мм.

Выводы, полученные по результатам высокоточного нивелирования, коррелируются с дилатацией земной поверхности по GPS/ГЛОНАСС данным (рис. 6) за 2012—2016 гг. [20]. Видно, что правая часть профиля 1 нивелирования (пункты 1208, 1209 GPS-сети) в районе Правобережного разлома испытывают максимальную положительную дилатацию, а следовательно, поднятие в вертикальном направлении. Далее на запад величина дилатации несколько снижается, но в зоне Атамановского разлома опять возрастает, переходя затем резко в отрицательную сторону на западном его крыле. Блок, лежащий между разломами Атамановским на востоке и Муратовским на западе, испытывал положительную дилатацию (поднятие). Далее на запад структурный блок Западно-Сибирской платформы в течение указанного периода времени испытывал опускание.

Таким образом, сходимость в направленности горизонтальной и вертикальной компонент СДЗК, измеренных двумя различными методами, позволяет сделать вывод об их качественной достоверности и возможности оценки деформационных процессов на других близлежащих участках, например, на участке Енисейский.

Из рис. 6 видно, что в его западной части зафиксирована положительная дилатация, а в восточной — отрицательная. Смена знаков происходит по западному краю участка, приблизительно в зоне Меридионального разлома.

Расчет дилатации ∆ (скорости деформаций) земной поверхности за период с 2012 по 2016 гг. показал наличие четырех относительно аномальных участков (рис. 6):

а) участок в районе пунктов 1204, 1205, 1206 ($\Delta = 5 \cdot 10^{-7}$ в год), находящихся в зоне Атамановского разлома, который является контактным швом между Сибирской платформой и Западно-Сибирской плитой;

б) участок, расположенный на левом берегу р. Енисей — пункт 1213 ($\Delta = -1,3 \cdot 10^{-7}$ в год);

в) зоны сжатия и растяжения на участке Енисейский ($\Delta = 8 \cdot 10^{-8}$, $\Delta = -3 \cdot 10^{-8}$ в год);

г) участок в районе Правобережного разлома, где находятся пункты 1207, 1208, 1209 ($\Delta = -7 \cdot 10^{-8}$ в год).

Существует формула для расчета предельных значений деформаций изгиба, которая имеет следующий вид [11]:

$$\Theta < \frac{C\varepsilon_n}{T}$$

где Θ — среднегодовая скорость изгиба; ε_n — предельная деформация изгиба; T — время; C — эмпирический коэффициент, который по данным геодезических наблюдений лежит в диапазоне 3-5 [11].

В таком случае предельные среднегодовые скорости относительных деформаций изгиба не должны превышать значения 5·10⁻⁵ в год. Измеренные деформации (рис. 7) фактически на два порядка меньше. Если при этом учесть цикличный знакопеременный процесс деформирования, то суммарные деформации еще меньше.



Рис. 6. Карта дилатации земной поверхности по данным GPS/ГЛОНАСС наблюдениям за период 2012—2016 гг.

Сейсмотектонические условия территории

Наложение глобального поля тектонических напряжений на структурную нарушенность литосферы определяет локальные сейсмотектонические условия в районе исследования. Анализ сейсмотектонических аспектов в районе Нижнеканского массива приведен в работе [1]. В работе [7] площадка размещения ПГЗРО отнесена к 6,0-балльной зоне (1000 лет карта В), 7,0-балльной зоне (5000 лет карта С) и 8,0 балльной зоне (10000 лет карта D). При этом предполагается, что интенсивность возможного землетрясения будет составлять М ~ 4,5 [1]. На рис. 7 приведен фрагмент ЛДФ-модели зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ), использованной при создании карт ОСР-97 района Красноярск-Железногорск-Дивногорской агломерации (по В. И. Уломову) [2].

Район исследований на данной карте находится в 5,5-балльном домене, на замыкании линеамента L580. Для учета Малиновской палеосейсмодислокации сотрудниками КНИИГиМС в линеаменте L580 максимальная магнитуда была увеличена до 7,0 (до этого потенциал указанного линеамента был M = 6,0). Для получения убедительных оценок сейсмической опасности на исследуемой территории необходимо открытие нескольких сейсмических станций к северу от изучаемых объектов (севернее параллели 56°N) и осуществление полноценных работ по детальному сейсмическому районированию.

Статистическая обработка данных в сейсмоактивных районах земного шара, устанавливающая связь возможной магнитуды землетрясения в регионе от среднего размера блока имеет вид

$$M = 0,003 L_{6\pi} + 4,76, \tag{2}$$

где $L_{\rm бл}$ — средний размер структурного блока.

Результаты интерпретации аэромагнитных данных (метод деконволюции Эйлера) с последующим применением алгоритма «Роден» позволили установить средний размер структурного блока фундамента в пределах Нижнеканского массива равным 7 км [3, 28]. Если подставить это значение в выражение (2), то получаем значение наиболее вероятной магнитуды землетрясения для среднего размера структурного блока М = 4,78. Полученный результат соответствует максимальному расчетному землетрясению 8 баллов. Следует отметить, что, по данным Н. В. Шебалина, историческое землетрясение под Красноярском имеет магнитуду 4,8.

Экспериментальные данные дают основание утверждать, что по известной силе максимального землетрясения может быть оценена ширина разлома, инициирующего сейсмическое событие, что существенно важно для «погребенных разломов» [18].

Энергия землетрясения М = 4,5 соответствует

$$M = 2/3 (lg E - 4,8),$$

$$lg E - 6,75 + 4,8 = 11,5 S,$$

$$K = 12.$$
 (3)

Тогда приблизительная ширина разлома будет составлять 2,9 км. Если представить негативный вариант тектонического развития района, при котором активная часть Атамановского разлома



Рис. 7. Фрагмент ЛДФ-модели зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ), использованной при создании карт ОСР-97 района Красноярск-Железногорск-Дивногорской агломерации (по В. И. Уломову). Черный квадрат — участок Енисейский

и Муратовский сброс могут быть сейсмогенерирующими (в перспективе длительного существования ПГЗРО), то значение 2,9 км укладывается в его максимальную динамическую зону влияния, соответствующую 4,1 км. При землетрясении 10¹³ Дж ширина разлома уже составляет 6,2 км.

Отсутствие достоверных данных о реальной ширине зоны влияния, т. е. области тектонической диспергации пород, а следовательно, и аномальной проницаемости подземных вод, определяет необходимость решения следующей задачи исследований на участке Енисейский детальное изучение зон динамического влияния тектонических разломов в непосредственной близости от ПИЛ. При этом следует подчеркнуть, что разлом и его зона влияния являются областями повышенной фильтрации подземных вод с верхнего гидрогеологического этажа на нижние горизонты [9].

Инструментальные исследования НДС в выработках Горно-химического комбината [13—25] дают основание предположить, что главные напряжения составляют величину $\sigma_{max} > 20$ —30 МПа. Например, для северо-западного Урала [6] σ_{max} достигает существенно больших величин — до 40—50 МПа в зонах локальной концентрации напряжений на замыканиях, изгибах и сопряжениях тектонических разломов. Это касается и участка Енисейский. Можно допустить возможность вероятности образования разрыва,

пересекающего рабочую зону ПГЗРО [5], тогда сейсмический эффект такого микроземлетрясения с гипоцентром в ближней зоне приведет к потере изоляционных свойств не только СИБ, но и изоляционных свойств структурно-тектонического блока в целом.

Структурно-тектоническая неоднородность породного массива, включающего в себя «метастабильные» области, существенно затрудняет возможности прогнозирования динамических форм проявления горного давления. В связи с этим мониторинг микросейсмичности в широком частотном диапазоне в пределах ПГЗРО является необходимым на всех стадиях ведения горных работ: от проходки стволов до проходки выработок ПИЛ и загрузки контейнеров с РАО. Это подтверждается опытом изучения микросейсмичности и прогнозе по ее результатам мест будущих горных ударов, которые выполнили канадские ученые в ПИЛ AECL, а также при сейсмическом мониторинге во время отработки месторождений никеля на больших глубинах [23, 25].

Таким образом, инженерная оценка сейсмотектонических условий района требует детального изучения разломной тектоники, внешнего поля напряжений и мониторинга локальной микросейсмичности в пределах участка Енисейский, а также оценку вероятности разрушения подземных выработок в динамической форме.

Задачи математического моделирования НДС и воздействия тепловых полей

Нарушение изоляционных свойств пород и разрушение пород в динамической форме может вызвать также целый ряд техногенных факторов. Основными из них являются: а) геометрия и размеры подземной части ПГЗРО, определяющие концентрацию локальных полей напряжений в приконтруной зоне; б) развитие процессов сдвижений в налегающей толще; в) тепловое воздействие контейнеров с РАО, особенно в первые десятилетия эксплуатации ПГЗРО.

Подземная часть ПГЗРО представляет собой систему выработок, расположенных на двух горизонтах, размером 1500×1000×80 метров. На рис. 8а показан вид сверху на горизонт с выработками ПГЗРО, из которых будут бурится вертикальные скважины для закладки РАО (горизонт +5 м), а на рис. 8б — разрез уровней горизонтальных выработок и вертикальной скважины (длина 75 м) для размещения РАО (размеры взяты из Проекта ПГЗРО).

Остеклованные высокоактивные РАО, заключенные в пеналы, будут размещаться в вертикальных скважинах глубиной 75 м, а кондиционированные РАО со слабым тепловыделением в невозвратных металлических контейнерах разместят внутри горизонтальных горных выработок на двух уровнях (один из вариантов рассматриваемого в настоящее время планировочного решения).

По различным оценкам, контейнеры с РАО при температуре порядка 120—200 °С будут генерировать тепло в окружающий массив в течение более 500 лет. Таким образом, в рабочей зоне ПГЗРО фактически существуют три взаимовлияющих источника, способных вызвать деструкцию геологической среды. Это литостатическое давление, достигающее на глубине 500 м 14 МПа, тектонические напряжения, которые могут превысить литостатические в 2 раза, и температурные поля от воздействия РАО. Очевидно, что в математических моделях необходимо учитывать эти факторы.

Ранее был выполнен предварительный расчет НДС для скважин, содержащих контейнеры с тепловыделяющими РАО, в зависимости от времени [15]. Моделирование проводилось методом конечных элементов, программой FEMAP NX NASTRAN. В настоящее время тестовые расчеты показали, что для решения подобных задач более удобен пакет *Comsol Multiphysics*, основанный на передовых численных методах компьютерного моделирования физических задач.



Рис. 8. Схема расположения РАО в ПГЗРО: а) вид сверху на горизонт +5 м, б) разрез двух уровней горизонтальных выработок и вертикальной скважины для контейнеров с РАО

При расчетах [15] по границам модели было задано тектоническое поле главных напряжений. Внутри слоя действуют напряжения, создаваемые температурным полем контейнеров с РАО. При этом принималось, что ось главного тектонического напряжения σ_{33} направлена вдоль оси ОҮ. Вдоль оси ОХ действует напряжение бокового отпора порядка $1/3 \sigma_{33}$. Главные тектонические напряжения были заданы следующими: $\sigma_{yy} = 30$ МПа, а $\sigma_{xx} = 10$ МПа. $T_{M}(x,y)$ — температура массива зависит от координат.

На рис. 9 представлено распределение интенсивности напряжений в области скважины по прошествии 20, 100 и 400 лет после размещения контейнеров с ВАО соответственно. Зоны наиболее высоких концентраций напряжений (~45 МПа) расположены вдоль оси X с двух сторон от скважины (рис. 9б).

Общая концентрация зон повышенных напряжений в области скважины через 20 лет после захоронения (рис. 9б) значительно больше, чем в других двух случаях (рис. 9в, г).

На рис. 10 показан график изменения интенсивности напряжений в точке А, находящейся на оси ОХ на расстояние 120 см от центра скважины с РАО. В качестве критерия разрушения использован интеграл Бейли:

$$\int_0^{t_k} \left(\tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma_i(t)}{RT(t)} \right)^{-1} dt = 1, \qquad (4)$$

где τ_0 — период тепловых колебаний атомов; U_0 — энергия активации разрушения; γ — структурный коэффициент; $\sigma_i(t)$ — интенсивность напряжений;

T(t) — температура; R — универсальная газовая постоянная; t_k — время начала диспергации приствольной зоны с момента прогрева массива.

Интервал времени диспергации приствольной зоны скважины в этих условиях составляет примерно 8000 лет. Продвижение зоны диспергации вглубь массива неизбежно, вместе с тем эта область не превышает начального радиуса скважины. Диспергация пород в ближней зоне скважины приводит к существенному изменению их физико-механических и тепловых свойств, которые трудно оценить в теоретических расчетах, поэтому для корректировки модели необходимы натурные исследования непосредственно в ПИЛ.

Выводы

Фундаментальными свойствами геологической среды, определяющими сохранность изоляционных свойств пород в ближней и дальней зонах ПГЗРО, являются структурно-тектоническая нарушенность (разломы и крупные трещины) и кинематика структурно-тектонических блоков (тектонический крип и сейсмичность). Именно с этими параметрами связано напряженно-деформированное состояние структурно-тектонического блока, вмещающего выработки ПГЗРО. Рассмотренные выше сейсмотектонические и геодинамические аспекты участка Енисейский позволяют наметить круг первоочередных исследований в ПИЛ в соответствии со «Стратегией создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов», утвержденной Генеральным директором ГК «Росатом» в марте 2018 года.



Рис. 9. Интенсивность напряжений σ_i(t) в области скважины в МПа: a) тепловые нагрузки не учитывались; 6) 20 лет; в) 100 лет; г) 400 лет после размещения РАО



Рис. 10. Изменение интенсивности напряжений от времени в точке А, находящейся в 120 см от центра скважины с РАО

Еще до начала проходки шахтных стволов в 2019 году необходимо начать работы по геодинамическому мониторингу вертикальных и горизонтальных СДЗК на основе ГНССнаблюдений и высокоточного нивелирования. Это определяется еще и тем, что для устойчивого выделения тренда современных движений на фоне помех необходим срок не менее 5—7 лет. Необходимо скорректировать существующую сеть геодинамических наблюдений на участке Енисейский, заложить дополнительные пункты в южной части района.

Результаты этих исследований позволят получить граничные напряжения и кинематические условия на границах структурно-тектонического блока, вмещающего ПГЗРО, и в приконтурной части выработок ПГЗРО для последующего 3D-моделирования напряженно-деформированного состояния.

Обеспечить безопасность подземной изоляции ВАО можно только вне объемов зон динамического влияния активных разломов. Поэтому также необходимы геологические исследования по уточнению размеров зон динамического влияния Атамановского и Правобережного разломов и более мелких разломов в непосредственной близости от ПИЛ. Итогом должна стать карта детального геодинамического районирования участка Енисейский.

Результаты инструментальных наблюдений за НДС в выработках Горно-химического комбината дают основание утверждать, что напряжения могут достигать значительных величин, что может инициировать разрушение хрупких пород в динамической форме при проходке выработок ПИЛ. Поэтому задача оценки удароопасности пород, которая исследована в ОВОС явно в недостаточном объеме, требует детальной проработки на стадии подготовительных горных работ до начала проходки выработок ПИЛ.

Прогнозирование устойчивости геологической среды на длительные периоды времени должно осуществляться на основе системного анализа взаимосвязанных компонент двух природно-техногенных систем — геологической среды и выработок ПГЗРО. На начальной стадии организации работ в ПИЛ важную роль будут играть математические модели напряженно-деформированного состояния среды с учетом воздействия тектонических полей напряжений и тепловыделения РАО. В комплексе с экспериментами по влиянию теплового поля на сохранность приконтурной части массива методы математического моделирования (программа COMSOL) позволят более строго обосновать конструктивные параметры целиков и скважин для закладки контейнеров с ВАО.

В Программу исследований ПИЛ, помимо чисто геомеханических исследований, необходимо включить сейсмический и сейсмоакустический мониторинг в широком частотном диапазоне с возможностью локации очагов разрушения, т. к. они являются следствием тектонической активности и разрушения пород в зоне влияния тектонических разломов.

Работа подготовлена в рамках работ по теме НИР: «Исследование кинематики блочных массивов при геодинамическом районировании мест размещения радиационно опасных объектов» № госрег. АААА-А17-117012610082-9.

Литература

1. Андерсон Е. Б., Белов С. В., Камнев Е. Н., Колесников И. Ю., Лобанов Н. Ф., Морозов В. Н., Татаринов В. Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов. М.: «Горная книга». 2011. 592 с.

2. Выполнение комплекса работ по обеспечению безопасности объектов цеха № 1 ИХЗ: в 2-х кн. / *Р. Р. Хафизов, С. А. Мокрых, В. А. Зуев, О. В. Климов* и др. Железногорск: ООО «Геолком». 2011. 192 с.

3. Гвишиани А. Д., Белов С. В., Агаян С. М., Родкин М. В., Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Богоутдинов Ш. Р. Методы искусственного интеллекта при оценке тектонической стабильности Нижнеканского массива // Инженерная экология. № 2. 2008. С. 3–14.

4. Гвишиани А. Д., Дзебоев Б. А., Татаринов В. Н. Алгоритмическая кластеризация в оценке сейсмической опасности при размещении объектов ядерного топливного цикла // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и решения в экологии горного дела». М.: АО ВНИ-ПИпромтехнологии, 2017. С. 42—48.

5. *Добровольский И. П.* Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. 2009. 240 с.

6. *Зубков А. В.* Напряженное состояние земной коры Урала // Литосфера. 2002. № 3. С. 3—18.

7. Изменение №1 в отчет по обоснованию безопасности деятельности по размещению и сооружению не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижнеканский массив) в составе подземной исследовательской лаборатории. ФГУП «НО РАО». М. 2016. 60 с.

8. *Колмогоров П. П., Колмогоров В. Г.* Современные вертикальные движения земной коры Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 6. С. 455—466.

9. 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.

10. *Крапивнер Р. Б., Плугина Т. А., Язвин А. Л.* Роль разломов в формировании фильтрационных неоднородностей верхнего гидрогеологического этажа // Разведка и охрана недр. 2003. № 10. С. 34—38. 11. *Кузьмин Ю. О.* Современная геодинамика опасных разломов // Физика Земли. 2016. № 5. С. 87—101. DOI: 10.7868/S0002333716050070.

12. *Мазо А. Б., Поташев К. А., Калинин Е. И., Булыгин Д. В.* Моделирование разработки нефтяных месторождений методом суперэлементов // Матем. моделирование. 2013. Т. 25. № 8. С. 51–64.

13. *Морозов В. Н., Гупало Т. А., Татаринов В. Н.* Прогноз изоляционных свойств породного массива при размещении радиоактивных материалов в горных выработках // Горный вестник. 1999. № 6. С. 99—105.

14. *Морозов В. Н., Колесников И. Ю., Белов С. В., Татаринов В. Н.* Напряженно-деформированное состояние Нижнеканского массива — района возможного захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология. 2008. № 3. С. 232—243.

15. Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Каган А. И., Пятыгин В. А. Влияние температуры на изоляционные свойства породных массивов при захоронении радиоактивных отходов // ГИАБ. 2015. № 8. С. 338—345. 16. Николаев В. В., Врублевский А. А., Ахмадулин В. А., Кузнецов В. Е. Геодинамика и сейсмическое районирование материковой части Дальнего Востока. Владивосток: ДВО РАН, 2000. 90 с.

17. Разработка и обоснование геодинамической сети режимных наблюдений за современными движениями земной коры в районе возможного размещения ПГЗРО (Красноярский край, Нижне-канский массив): Технический отчет. ГСПИ. Железногорск, 2017. 78 с.

18. *Садовский М. А., Писаренко В. Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.

19. *Татаринов В. Н., Бугаев Е. Г., Татаринова Т. А.* К оценке деформаций земной поверхности по данным спутниковых наблюдений // Горный журнал.

2015. № 10. C. 27—32. DOI: dx.doi.org/10.17580/ gzh.2015.10.05.

20. Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Маневич А. И., Татаринова Т. А. Новые геодезические данные о цикличности геодинамических движений в зоне контакта Западно-Сибирской платформы и Сибирской плиты // Материалы IV Междунар. научно-практич. конф. «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных геоинформационных технологий». Часть 2. Майкоп. Издво «ИП Кучеренко В.О.», 2017. С. 182—189.

21. Требования к разведке места для захоронения ВАО в скальной горной породе (АСТЕР). / ДБЕ Технолоджи ГмбХ, ВНИПИ ПТ. 2005. М. 473 с.

22. Федеральные нормы и правила. Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях. РБ-019-17. М., 2017.

23. Case Study: ONKALO Underground Rock Characterization Facility. Kempanen K., Proceeding of the IAEA Workshop on Need for and Use of Generic and Site-Specific Underground Research Laboratories to Support Siting, Design and Safety Assessment Developments, Jct. 7-9, 2014, Albuquerque, NM.

24. *Coppersmith, K.J., and Youngs, R.R.* Modeling fault rupture hazard for the proposed repository at Yucca Mountain, Nevada. High Level Radioactive Waste Management Program Committee, American Society of Civil Engineers, New York, NY 978-0-87262-891-5 (ISBN-13) 0-87262-891-4 (ISBN-10), 1992, Soft Cover, Pg. 2492. 2 vols.

25. *C. Derec Martin, Neil A. Chandler.* The potential for vault-induced seismicity in nuclear fuel waste disposal experience from Canada mines. Whiteshell Laboratories. Pinaba Manitoba. 1996. 20 p.

26. *Morozov V. N., Tatarinov V. N.* Tectonic processes development with time in the areas of HLW disposal from expert assessment to prognosis // Int. Nuclear Energy science and Technology. 2006. Vol. 2. No. 1/2. Pp. 65–74. DOI: 10.1504/IJNEST.2006.010648.

27. *Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Seelev I. N.* Study of the Present-Day Geodynamics of the Nizhnekansk Massif for Safe Disposal of Radioactive Wastes // Atomic Energy. 2017. Vol. 121, Iss. 3, pp. 203–207. DOI: 10.1007/s10512-017-0184-5.

28. *Tatarinov V. N., Morozov V. N., Kolesnikov I. Y., Tatarinova T. A.* Tectonic processes modeling and development with time in the areas of HLRW disposal // Conference of the International Association for mathematical geology. Geomathematics and GIS Analysis of Resources, Environment and Hazards. Beijing, China. 2007. Nº 1, pp. 199–202.

Информация об авторах

Морозов Владислав Николаевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник. Геофизический центр РАН (119296, Москва, ул. Молодежная, 3), e-mail: v.morozov@gcras.ru.

Татаринов Виктор Николаевич, доктор технических наук, зав. лаб. геодинамики, Геофизический центр РАН (119296, Москва, ул. Молодежная, 3), e-mail: v.tatatrinov@gcras.ru.

Кафтан Владимир Иванович, доктор технических наук, главный научный сотрудник. Геофизический центр РАН (119296, Москва, ул. Молодежная, 3), e-mail: v.kaftan@gcras.ru. *Маневич Александр Ильич,* младший научный сотрудник. Геофизический центр РАН (119296, Москва, ул. Молодежная, 3), e-mail: ai.manevich@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И. Подземная исследовательская лаборатория: геодинамические и сейсмотектоническеи аспекты безопасности // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 3 (4). — С. 16—29.

UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY: GEODYNAMIC AND SEISMOTTECTICAL ASPECTS OF SAFETY

Morozov V.N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I.

Geophysical Center of RAS, Moscow

Article received 22 May 2018

The article considers geodynamic and seismotectonic aspects of geoecological safety of underground isolation of highlevel radioactive waste on the section of the Yenisei Nizne-kansky massif. Identification of active tectonic disturbances and investigation of their kinematic features is the most important task of geomechanical research. Analysis of the results of instrumental observations of modern movements of the earth's crust has shown that the limiting average annual rates of relative flexural deformations do not exceed $5 \cdot 10^{-7}$ per year. However, the presence of compressive and tensile strains in the boundaries of the boundary indicates the need for a more detailed study of the geodynamics and seismotectonics of the Yenisei and adjacent areas in the framework of integrated underground research in the URL. Condition of geoecology for safe underground isolation of high-level radioactive waste (HLRW) is possible only

Condition of geoecology for safe underground isolation of high-level radioactive waste (HLRW) is possible only outside the volumes of dynamic impact zones of active faults, the dimensions of which are interrelated with the length of these faults. The approximate width of the zone of the dynamic effect of the fault can be 2.9 km for an earthquake with an energy M = 4.5.

Instrumental studies of stress-strain state in the workings of the Mining and Chemical Combine suggest that stresses can reach significant values in areas of local stress concentration that can initiate the destruction of brittle rocks in a dynamic form when driving the URL workings.

Identification of active tectonic disturbances and investigation of their kinematic features within the Yenisei and adjacent areas based on the use of space geodesy methods and high-precision re-leveling is the most important task of geomechanical research in URL.

In zones of local stress concentration, fragile rocks can be destroyed in dynamic form when driving the URL workings. This issue also requires detailed elaboration at the stage of preparatory mining operations in the construction of object of underground insulation HLRW.

Keywords: high-level radioactive waste, underground research laboratory, geodynamics, modern movements of the earth's crust, global navigation satellite systems, active faults.

References

1. Anderson E. B., Belov S. V., Kamnev E. N., Kolesnikov I. Yu., Lobanov N. F., Morozov V. N., Tatarinov V. N. *Podzemnaya izolyaciya radioaktivnyh othodov*. Moscow, "Gornaya kniga" Publ, 2011. 592 p. 2. Hafizov R. R., Mokryh S. A., Zuev V. A., Klimov O. V. et al. Vypolnenie kompleksa rabot po obespecheniyu bezopasnosti ob"ektov cekha № 1 IHZ: v 2-h kn. Zheleznogorsk, "Geolkom" Publ., 2011. 192 p. 3. Gvishiani A. D., Belov S. V., Agayan S. M., Rodkin M. V., Morozov V. N., Tatarinov V. N., Bogoutdinov Sh. R. Metody iskusstvennogo intellekta pri ocenke tektonicheskoj stabil'nosti Nizhnekanskogo massiva. *Inzhenernaya ehkologiya [Engineering Ecology*], 2008, no. 2, pp. 3–14.

4. Gvishiani A. D., Dzeboev B. A., Tatarinov V. N. Algoritmicheskaya klasterizaciya v ocenke sejsmicheskoj opasnosti pri razmeshchenii ob"ektov yadernogo toplivnogo cikla. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya "Problemy i resheniya v ehkologii gornogo dela". Moscow, VNIPIpromtekhnologii Publ., 2017, pp. 42—48.

 Dobrovol'skij I. P. Matematicheskaya teoriya podgotovki i prognoza tektonicheskogo zemletryaseniya. 2009. 240 p.
 Zubkov A. V. Napryazhennoe sostoyanie zemnoj kory Urala. *Litosfera*, 2002, no. 3, pp. 3–18.

7. Izmenenie Nº 1 v otchet po obosnovaniyu bezopasnosti deyatel'nosti po razmeshcheniyu i sooruzheniyu ne otnosyashchegosya k yadernym ustanovkam punkta hraneniya RAO, sozdavaemogo v sootvetstvii s proektnoj dokumentaciej na stroitel'stvo ob"ektov okonchatel'noj izolyacii RAO (Krasnoyarskij kraj, Nizhnekanskij massiv) v sostave podzemnoj issledovatel'skoj laboratorii. Moscow, FGUP "NO RAO" Publ., 2016. 60 p.

8. Kolmogorov P. P., Kolmogorov V. G. Sovremennye vertikal'nye dvizheniya zemnoj kory Enisejskogo kryazha. *Russian Geology and Geophysics*, 2004, vol. 45, no. 6, pp. 455–466. 9. Kochkin B. T., Mal'kovskij V. I., Yudincev S. V. Nauchnye osnovy ocenki bezopasnosti geologicheskoj izolyacii dolgozhivushchih radioaktivnyh othodov (Enisejskij proekt). Moscow, IGEM RAN Publ., 2017. 384 p.

10. Krapivner R. B., Plugina T. A., YAzvin A. L. Rol' razlomov v formirovanii fil'tracionnyh neodnorodnostej verhnego gidrogeologicheskogo ehtazha. *Razvedka i ohrana nedr,* 2003, no. 10, pp. 34–38.

11. Kuzmin Y. O. Recent geodynamics of dangerous faults. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2016, vol. 52, no.5, pp.709–722. DOI: 10.7868/S0002333716050070. 12. Mazo A. B., Potashev K.A., Kalinin E. I., Bulygin D. V. Oil reservoir simulation with the superelement method. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2013, vol. 25, no. 8, pp. 51–64. (In Russian).

13. Morozov V. N., Gupalo T. A., Tatarinov V. N. Prognoz izolyacionnyh svojstv porodnogo massiva pri razmeshchenii radioaktivnyh materialov v gornyh vyrabotkah. *Gornyj vestnik*, 1999, no. 6, pp. 99–105.

14. Morozov V. N., Kolesnikov I. Yu., Belov S. V., Tatarinov V. N. Stress-and-strain state of the Nizhnekanskii granite massif as a possible site for radioactive waste disposal. *Environmental Geoscience*, 2008, no. 3, pp. 232–243. (In Russian).

15. Tatarinov V. N., Morozov V. N., Kagan A. Ya., Piytigin V. A. Temperature effect on isolation characteristics of rock mass for nuclear waste disposal. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2015, no. 8, pp. 338–345. (In Russian).

16. Nikolaev V. V., Vrublevskij A. A., Ahmadulin V. A., Kuznecov V. E. *Geodinamika i sejsmicheskoe rajonirovanie materikovoj chasti Dal'nego Vostoka*. Vladivostok, DVO RAN Publ., 2000. 90 p.

17. Razrabotka i obosnovanie geodinamicheskoj seti rezhimnyh nablyudenij za sovremennymi dvizheniyami zemnoj kory v rajone vozmozhnogo razmeshcheniya PGZRO (Krasnoyarskij kraj, Nizhnekanskij massiv): Tekhnicheskij otchet. GSPI. Zheleznogorsk, 2017. 78 p.

18. Sadovskij M. A., Pisarenko V. F. Sejsmicheskij process v blokovoj srede. Moscow, Nauka Publ., 1991. 96 p. 19. Tatarinov V. N., Bugaev E. G., Tatarinova T. A. Crust deformation assessment by satellite observation data in the context of validation program for safe geological radioactive waste disposal and isolation. *Mining Journal*, 2015, no. 10. pp. 27–32. (In Russian). DOI: 10.17580/gzh.2015.10.05. 20. Tatarinov V. N., Morozov V. N., Manevich A. I., Tatarinova T. A. Novye geodezicheskie dannye o ciklichnosti geodinamicheskih dvizhenij v zone kontakta Zapadno-Sibirskoj platformy i Sibirskoj plity. *Materialy IV Mezhdunar. nauchno-praktich. konf. "Prikladnye aspekty geologii, geofiziki i geoehkologii s ispol'zovaniem sovremennyh geoinformacionnyh tekhnologij"*. Chast' 2. Majkop, "IP Kucherenko V.O." Publ., 2017, pp. 182–189. 21. Trebovaniya k razvedke mesta dlya zahoroneniya VAO v skal'noj gornoj porode (ASTER). DBE Tekhnolodzhi GmbH, VNIPI PT. Moscow, 2005. 473 p.

22. Federal'nye normy i pravila. Ocenka iskhodnoj sejsmichnosti rajona i ploshchadki razmeshcheniya ob"ekta ispol'zovaniya atomnoj ehnergii pri inzhenernyh izyskaniyah i issledovaniyah. RB-019-17. Moscow, 2017.

23. Case Study: ONKALO Underground Rock Characterization Facility. Kempanen K., Proceeding of the IAEA Workshop on Need for and Use of Generic and Site-Specific Underground Research Laboratories to Support Siting, Design and Safety Assessment Developments, Jct. 7-9, 2014, Albuquerque, NM.

24. Coppersmith, K. J., and Youngs, R. R. Modeling fault rupture hazard for the proposed repository at Yucca Mountain, Nevada. *High Level Radioactive Waste Management Program Committee, American Society of Civil Engineers,* New York, NY 978-0-87262-891-5 (ISBN-13) | 0-87262-891-4 (ISBN-10), 1992, Soft Cover, Pg. 2492. 2 vols.

25. C. Derec Martin, Neil A. Chandler. *The potential for vault-induced seismicity in nuclear fuel waste disposal experience from Canada mines*. Whiteshell Laboratories. Pinaba Manitoba. 1996. 20 p.

26. Morozov V. N., Tatarinov V. N. Tectonic processes development with time in the areas of HLW disposal from expert assessment to prognosis. *Int. Nuclear Energy science and Technology*, 2006, vol. 2, no. ¹/₂, pp. 65–74. DOI: 10.1504/IJNEST.2006.010648.

27. Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Seelev I. N. Study of the Present-Day Geodynamics of the Nizhnekansk Massif for Safe Disposal of Radioactive Wastes. *Atomic Energy*, 2017, vol. 121, iss.3, pp 203–207. DOI: 10.1007/s10512-017-0184-5.

28. Tatarinov V. N., Morozov V. N., Kolesnikov I. Y., Tatarinova T. A. Tectonic processes modeling and development with time in the areas of HLRW disposal. Conference of the International Association for mathematical geology. *Geomathematics and GIS Analysis of Resources, Environment and Hazards*. Beijing, China, 2007, no. 1, pp. 199–202.

Information about the authors

Morozov Vladislav Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Geophysical Center of RAS (3, Molodezhnaya st., Moscow, 119296, Russia), e-mail: v.morozov@gcras.ru.

Tatarinov Viktor Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Head. lab., Geophysical Center of Russian Academy of Sciences (3, Molodezhnaya st., Moscow, 119296, Russia), e-mail: v.tatatrinov@gcras.ru.

Kaftan Vladimir Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher. Geophysical Center of RAS (3, Molodezhnaya st., Moscow, 119296, Russia), e-mail: v.kaftan@gcras.ru.

Manevich Alexander Ilyich, junior research. Geophysical Center of RAS (3, Molodezhnaya st., Moscow, 119296, Russia), e-mail: ai.manevich@yandex.ru.

Bibliographic description

Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I. Underground Research Laboratory: Geodynamic and Seismottectical Aspects of Safety. *Radioactive Waste*, 2018, no. 3 (4), pp. 16–29. (In Russian).