УДК 621.039.
7:504

В.Н. Морозов, А.С. Батугин, И.Ю. Колесников, В.Н. Татаринов, А.И. Каган, Т.А. Татаринова

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ИЗОЛЯЦИИ РАО*

Представлены результаты прогнозирования устойчивости структурно-тектонических блоков земной коры при выборе мест изоляции высокоактивных радиоактивных отходов. На примере Нижнеканского гранитоидного массива, рассматриваемого в настоящее время как наиболее вероятное место захоронения РАО в России, показана методология прогнозирования изоляционных свойств породных массивов. Блоки с высокой концентрацией интенсивности напряжений потенциально опасны для развития тектонической деструкции.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, глубинное захоронение РАО, состояние геологической среды, напряженно-деформированное состояние массива.

За период интенсивного развития атомной промышленности на территории России был накоплен огромный объем радиоактивных отходов активностью более $5{,}9\times10^9$ Кюри и объемом свыше 510 млн м^3, представляющих чрезвычайную опасность для населения и окружающей среды. До недавнего времени преобладала идеология долговременного хранения РАО и отложенного решения вопросов их окончательной изоляции. Масштабное решение проблем с РАО, началось только в последние годы, когда в российском обществе сформировалось понимание того, что безопасность обращения с РАО, является приоритетным условием развития атомной промышленности и экономики страны.

В 2011 г. был принят ключевой для атомной отрасли Федеральный закон «Об обращении с РАО и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от

* Работа выполнена в рамках ГК Н.4б.43.9Б.14.1059 от 28.03.2014.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 251–262.
© 2016. В.Н. Морозов, А.С. Батугин, И.Ю. Колесников, В.Н. Татаринов, А.И. Каган, Т.А. Татаринова.

11.07.2011 № 190-ФЗ, который предусматривает обязательное захоронение всего объема накопленных и производимых РАО.

Наиболее токсичными и опасными являются тепловыделяющие высокоактивные радиоактивные отходы[1] (ВАО). Удаление их из среды обитания человека, отражает важнейшую общественную потребность населения страны и при существующем научно-техническом уровне может быть реализовано единственным осуществимым способом – захоронением ВАО в глубокие геологические формации. Для этого необходимо выбрать такие участки земной коры, где свойства и состояние геологической среды гарантируют их изоляцию в течение всего срока радиобиологической опасности ВАО – 10^4–10^5 лет.

В настоящее время изучаются возможности подземной изоляции ВАО в различных геологических формациях: в солях (Германия, США), в гранитах (Швеция, Финляндия, Швейцария, Канада, Россия), в глинах (Франция, Швейцария, Бельгия) и туфах (США). И хотя сама идея глубинного захоронения РАО проста и очевидна, пока еще ни в одной стране не начата эксплуатация геологического хранилища ВАО. Правительством РФ в конце 90-х годов принято решение о строительстве первого в России пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Красноярском крае (Нижнеканский массив). Итогом многолетних инженерно-геологических изысканий, которые проводились в пределах массива, начиная с 1992 г., стал выбор участка «Енисейский».

Согласно требованиям МАГАТЭ, обязательным начальным этапом создания пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО) является строительство подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), необходимой для уточнения характеристик вмещающего массива горных пород. Работы в ПИЛ на глубине 500 м планируется выполнить до 2024 г., после чего будет принято окончательное решение о пригодности (или не пригодности) массива горных пород для захоронения РАО.

Международный опыт выбора площадок, пригодных для изоляции ВАО, методологически основан на поиске в относительно стабильных геологических районах наименее нарушенного структурно-тектонического блока при его максимально возможных размерах. Однако, «подходящие» гидрогеологические условия и характеристики в блоке, существующие на момент начала

[1] К ВАО относятся радиоактивные отходы, в которых удельная активность бета-, гамма излучающих нуклиды более 107 кБк/кг, а трансурановых радионуклидов более 10^5 кБк/кг.

строительства ПГЗРО, не могут гарантироваться на весь проектируемый срок его эксплуатации. За столь длительный период геодинамические процессы способны кардинально изменить гидрогеологический режим в геологической среде (уровень подземных вод, напор водоносных горизонтов, вызвать образование новых и раскрытие старых каналов инфильтрации флюидов и т.д.). Но набольшую угрозу представляет вероятность тектонической деструкции структурно-тектонических блоков, которые находятся в поле нелинейно изменяющихся тектонических сил. При этом внутри структурно-тектонических блоков (СТБ) существует потенциальная возможность образования новых тектонических разломов или активизации «пассивных» разломов с последующим проникновением подземных вод к контейнерам с ВАО и выносом радионуклидов в окружающую среду.

На начальной стадии проектирования и строительства ПИЛ очень важно рассчитать оптимальные параметры объемно-планировочного решения подземной части ПГЗРО, под которыми понимается: ориентировка подземных выработок относительно действия главных тектонических напряжений, глубина их расположения, геометрические размеры выработок и размеров целиков между выработками, расстояние между горизонтами и др.

Нижнеканский массив расположен в нескольких десятках километров на северо-востоке от г. Красноярск. Он вытянут с северо-запада на юго-восток примерно на 60 км, при средней ширине около 30 км. Анализ особенностей геологического строения НКМ с привлечением новых алгоритмов искусственного интеллекта для анализа геолого-геофизической информации [6] позволили нам построить структурно-тектоническую карту Нижнеканского массива (рис. 1) [3].

Следующим этапом исследований стало моделирование напряженно-деформированного состояния НКМ, надежность которого зависит от соблюдения условий подобия. Одно из важнейших условий это геометрическое подобие исходной структурно-тектонической модели реальному массиву. Для реализации этого условия была построена упрощенная структурно-тектоническая модель НКМ [4]. Ее особенностью является то, что контакты массива и границы разновозрастных толщ, а также линии наиболее крупных разломов аппроксимированы в виде совокупности прямолинейных отрезков, что несколько упрощает реальную геологическую ситуацию.

Вторым важным фактором соблюдения подобия является ориентировка главных усилий, соответствующая выявленной

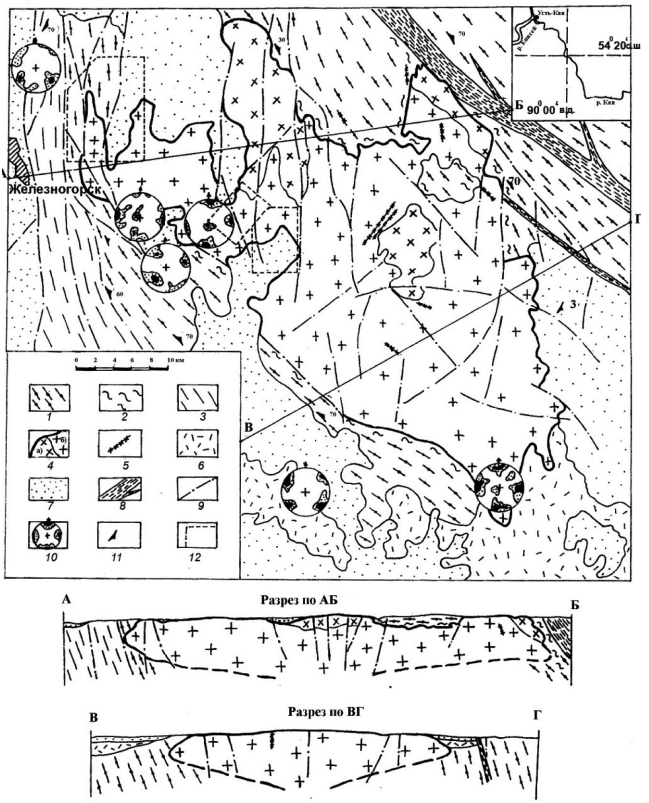

Рис. 1. Структурно-тектоническая схема НКМ: 1 – гнейсовый комплекс (AR); 2 – приконтактовая мигматизация; 3 – слюдяно-гнейсовый комплекс с амфиболитами, кварцитами и мраморами (AR – PR); 4 – контур гранитоидов НКМ: а – диориты и гранодиориты 1-й фазы, б – граниты и лейкограниты 2-й фазы; 5 – дайки кислого состава; 6 – терригенно-вулканогенные отложения (PZ2); 7 – терригенные отложения (J); 8 – зоны милонитов; 9 – основные разломы, выделенные по геолого-геофизическим и структурно-геоморфологическим данным; 10 – круговые диаграммы ориентировки трещин; 11 – элементы залегания пород; 12 – контуры участков детальных исследований (с юго-востока на северо-запад – «Каменный», «Итатский», «Енисейский»)

при расшифровке геодинамической эволюции территории. По геологическим данным был сделан вывод, что напряженное состояние района определяется, главным образом, тангенциальными сжимающими усилиями, ориентированными в ЮЗ-СВ направлении, поперек общего простирания жесткой глыбы Южно-Енисейского кряжа. Тектонические сжимающие усилия и ось σ_3 ориентирована по азимуту 230–240°. Расчет напряжен-

но-деформированного состояния в массиве производился методом конечных элементов в форме перемещений на основе четырехугольных изопараметрических конечных элементов. Выбор метода обусловлен как физическими соображениями (обеспечением условия минимальности полной потенциальной энергии деформации для всего массива), так и эффективностью его компьютерной реализации.

В качестве обобщенного критерия при анализе НДС рассматривалась интенсивность напряжений σ_i, представленная в виде карты изолиний напряжений (рис. 2) и ее объемной модели. При анализе результатов использовалось также распределение сдвиговой компоненты напряжений τ_{xy}. С учетом свойств горных пород средняя интенсивность напряжений, на ненарушенных участках составляет 26 МПа. На локальных участках массива расчетные значения σ_i превышают 80 МПа.

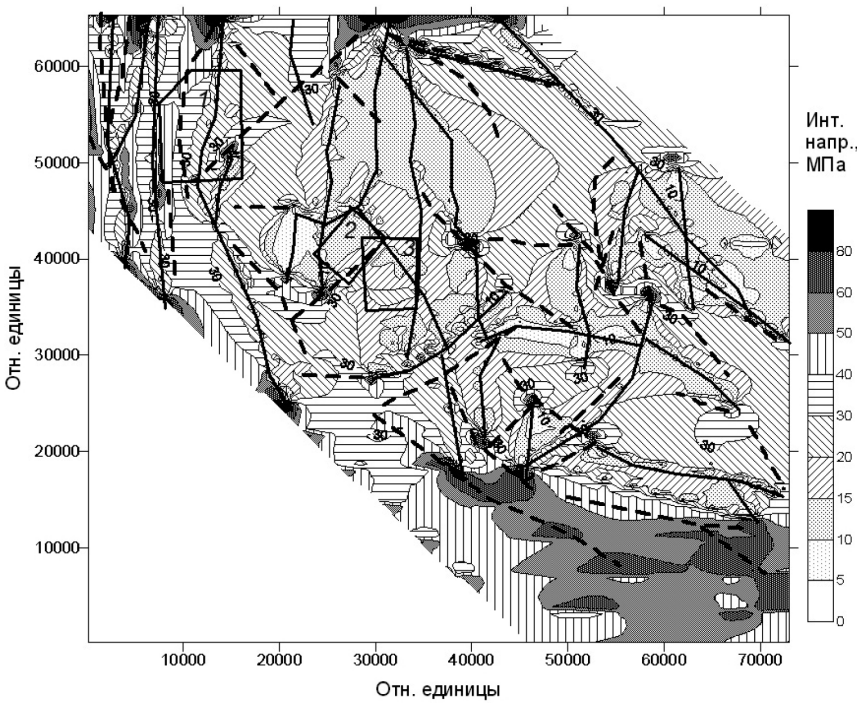

Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений σ_i в районе НКМ по данным моделирования методом конечных элементов. Линиями показаны разломы, которые были учтены при моделировании, пунктиром прогнозируемые геодинамические зоны. Прямоугольниками выделены участки детальных исследований: 1 – Енисейский, 2 – Итатский, 3 – Каменный

Карты полей напряжений стали основой для геодинамического районирования территории с целью выбора мест подземной изоляции РАО в геологических формациях, а также участков для закладки ПИЛ. Очевидно, что зоны повышенной концентрации σ_i являются потенциально опасными с позиций дальнейшего развития процесса тектонической деструкции структурных блоков. На схеме распределения σ_i сплошными линиями показано положение разломов, которые учитывались при моделировании, а пунктиром – новые возможные геодинамические зоны. В строгом смысле это не новые разломы, а наиболее вероятные направления развития геодинамических зон, которые могут быть реализованы в процессе тектонической эволюции района, и, которые необходимо учитывать при выборе места захоронения РАО.

Выполненные расчеты показали, что прогноз деструкции СТБ только по результатам моделирования НДС носит качественный характер, не позволяющий проводить ранжирование породных массивов по уровню опасности. Поэтому был сделан вывод о необходимости многокритериального анализа полей напряжений на основе энергетического анализа концентрации напряжений с целью дополнения исследований практическими рекомендациями по выбору надежных участков захоронения ВАО. Для этого необходимо было ввести адекватные критериальные характеристики степени опасности НДС и определить соответствующие им уровни опасности, и, затем, путем сопоставления значений вычисленных уровней опасности, произвести ранжирование СТБ по убыванию соответствующего им уровня опасности.

Трудность решения поставленной задачи состояла в том, что непосредственное использование известных результатов механики разрушения, применимых для образцов горных пород, для исследуемого объекта с линейными размерами порядка десятков километров было бы очень грубым приближением. В данной ситуации существенен вопрос о том, какие же параметры могут быть приняты в качестве обобщенных характеристик НДС, «сигнализирующих» об опасности разрушения СТБ.

Для выбора стратегии решения задачи при условиях неполноты и неточности имеющихся исходных данных, а также в условиях неопределенности, связанной с мегаскопическим масштабным эффектом, мы руководствовались следующими статистическими положениями, используемыми в механике деформируемого твердого тела при решении задач прочности и разрушения:

1) с ростом сложности системы возможность точного представления решения уменьшается и более точная механическая постановка задачи увеличивает неопределенность решения;

2) объект состоит из множества элементов (статистического массива), каждый из которых имеет свою локальную прочность, оцениваемую прочностной критериальной характеристикой;

3) задача статистической выборки – сортировка статистического массива, результатом которой является упорядоченный список его элементов, в котором они расположены по признаку убывания критериальной характеристики;

4) для нарушения целостности объекта необходимо, чтобы вышла из строя некоторая группа его наиболее слабых звеньев, определяемых из упорядоченного (по убыванию степени опасности) списка элементов.

Исходя из приведенных физико-механических и статистических положений, была сформирована инженерная методика решения задачи.

На основе теории удельной потенциальной энергии формоизменения были выделены «безопасные» и «опасные» участки массива, напряжения в которых условимся называть соответственно малыми и большими напряжениями.

Условие обеспечения прочности имеет вид:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_x\sigma_z - \sigma_y\sigma_z + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)} = \sigma_i$$

где σ_i – интенсивность напряжений; σ_x, σ_y, σ_z, σ_{xy}, σ_{xz}, σ_{yz} – компоненты тензора напряжений.

Из теории упругости следует важная зависимость между максимальным касательным напряжением и интенсивностью напряжений (с использованием связи максимального и октаэдрического напряжений)

$$\left\{\sigma_i = \frac{3}{\sqrt{2}}\sigma_{xy_{ост}}, \sqrt{\frac{2}{3}} \le \frac{\sigma_{xy_{ост}}}{\sigma_{xy_{\max}}} \le \frac{2\sqrt{2}}{3}\right\} \Rightarrow \sigma_{xy_{\max}} \approx \frac{\sigma_i}{2}$$

где $\sigma_{xy_{\max}}$ – максимальное касательное напряжение; $\sigma_{xy_{ост}}$ – октаэдрическое касательное напряжение.

Для наглядной оценки концентрации напряжений введем вектора, которые в дальнейшем будем называть векторами концентрации энергии СТБ – с вершинами в центрах КЭ, и направлениями, противоположными градиенту потенциальной энергии (с механической точки зрения, это направления наискорейшего убывания потенциальной энергии деформации).

Длины этих векторов положим равными значениям (вводимых ниже) энергетических концентрационных характеристик НДС.

Учитывая физико-механическую мотивацию, связанную с явлением разрушения, параметры векторов концетрации энергии интерпретируются следующим образом:

• вершины – очаги зарождения нарушений сплошности;

• углы наклона к оси абсцисс – определяют направления возможного развития разрушения;

• длины – характеристики склонности к разрушению α, β, γ, δ – значения энергетических концентрационных параметров.

Из соображений обеспечения полноты и адекватности оценки концентрации напряжений ввведем концентрации по трем энергетическим характеристикам: потенциальной энергии формоизменения U_{dev}, потенциальной энергии деформации U и наибольшей изменяемости энергии – равной модулю ее градиента *grad U*.

В результате были введены следующие концентрационные характеристики.

1. Концентрация потенциальной энергии формоизменения, определяемая как отношение локального значения энергии формоизменения в структурном блоке к ее вычисленному среднему значению:

$$\propto (x, y) = \frac{U_{dev}}{\langle U_{dev} \rangle^{\Omega^{(k)}}},$$

где U_{dev} – девиаторная компонента энергии; $\langle U_{dev} \rangle^{\Omega^{(k)}}$ – среднее арифметическое компонент энергии по множеству блоков $\Omega^{(k)}$ ($k = 1, 2$).

Введенная функция отражает концентрацию девиаторной компоненты энергии, обусловленную неоднородностью механических свойств гетерогенной модели массива. Для гомогенной модели, получаемой осреднением всех механических неоднородностей, получаем: $\alpha^{hom} = 1$.

2. Концентрация потенциальной энергии деформации – как отношение локального ее значения к среднему:

$$\beta(x, y) = \frac{U}{\langle U \rangle^{\Omega^{(k)}}},$$

где U – потенциальная энергия в центре СТБ; $\langle U \rangle^{\Omega^{(k)}}$ – среднее арифметическое значений энергии в центрах структурных блоков $\Omega^{(k)}$ ($k = 1, 2$). В случае гомогенной модели имеем: $\beta^{hom} = 1$.

3. *Концентрация наибольшего убывания энергии*, определяемая как отношение локальной величины модуля градиента к вычисленному ее среднему значению:

$$\gamma(x,y) = \frac{|grad\,U|}{\left\langle |grad\,U| \right\rangle^{\Omega^{(k)}}},$$

где |*grad U*| – модуль градиента энергии; $\left\langle |grad\,U| \right\rangle^{\Omega^{(k)}}$ – среднее арифметическое этих значений в центрах СТБ множества $\Omega^{(k)}$ ($k = 1, 2$). Для гомогенной модели эта концентрация отсутствует: $\gamma^{hom} = 0$.

4. Для того, чтобы учесть все составляющие концентрации энергии по вектору $\vec{E}$, введем параметр, который назовем *концентрацией интенсивности энергии*:

$$\delta(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\propto^2 + \beta^2 + \gamma^2}$$

Оценку степени опасности НДС мы проводили на основе следующего энергетического концентрационного критерия: более опасным считается тот локальный уровень напряжений, которому соответствует большее значение введенного параметра энергетической концентрационной характеристики.

В результате сравнения численных значений параметров энергетических концентраций в СТБ мы получаем цепочку неравенств:

$$\varepsilon \in \left\{\varepsilon_j\right\}_{j=1}^{R} : \varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \ldots > \varepsilon_R$$

Последовательность нижних индексов в этих неравенствах (возрастание индекса соответствует убыванию степени опасности НДС) определяет множество значений уровней опасности:

$$\left\{\omega_j(\varepsilon)\right\} = \{1, 2, \ldots, R\}.$$

Основная оценка степени опасности НДС производится по «суммарному» параметру концентрации интенсивности энергии δ, поскольку он учитывает влияние концентраций по всем компонентам энергетического вектора.

Таким образом, предложенные в данной статье энергетические оценки концентрации напряжений дополняют картину напряженного состояния [4], позволяя в итоге решить практическую задачу о выборе надежных участков массива для захоронения ВАО, решение которой изложено в [5].

Примеры моделирования в форме векторных эпюр отражены на рис. 3, для больших напряжений $\sigma_i > [\sigma]$.

По полученной оценке уровней опасности НДС для случая исходных данных) из трех участков, рассмотренных в [3], наименее пригодным для захоронения ВАО оказался участок «Енисейский», а наиболее пригодным – участок «Итатский».

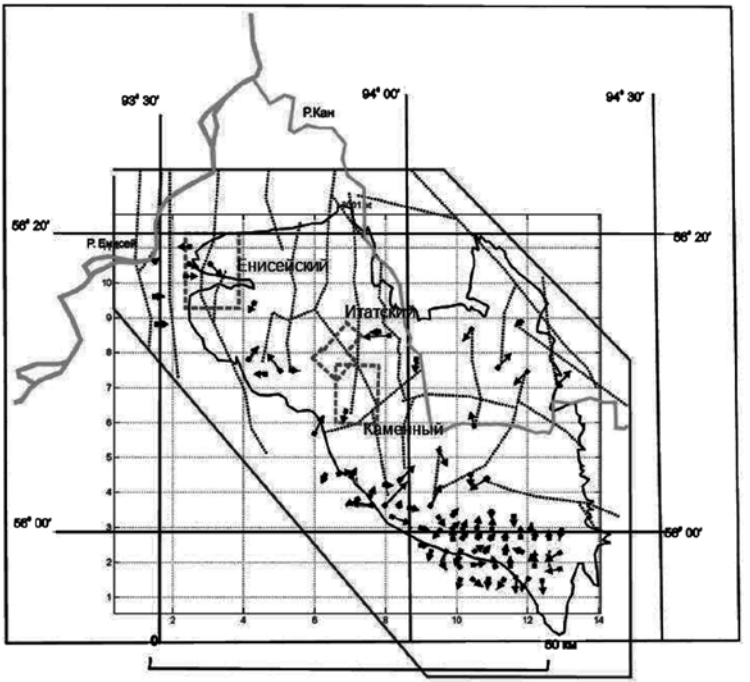

Рис. 3. Примеры моделирования направления деструкции структурных блоков

Выводы

1. Полученные при моделировании зоны высокой концентрации интенсивности напряжений являются зонами неустойчивого состояния геологической среды, в пределах которых наиболее вероятно развитие тектонической деструкции СТБ.

2. Кинематические принципы тектонической деструкции геологической среды в сочетании с полученными значениями напряжений дают возможность построить прогнозную схему разрушения СТБ как последовательные итерации продвижения активных разломов с перераспределением полей напряжений и изменением характера напряженно-деформированного состояния массива.

3. Полагая, что НДС определяется унаследованной тенденцией в развитии тектонического процесса и деформации массива до настоящего времени, и то, что эта тенденция сохраняется на период времени > 104 лет, появляется возможность оценки скорости роста интенсивности напряжений и времени возможной деструкции среды.

4. Детальное изучение конкурирующих участков, построение адекватных структурно-тектонических моделей, использование граничных условий процессов деформирования каждого из них, исходя из общей схемы напряженно-деформированного состояния НКМ, повысит достоверность оценок при практическом использовании полученных результатов. В этой связи геодинамические наблюдения с использованием GPS-технологии, дают новые возможности не только для оценки тектонической активности района на современном этапе его развития, но и для проверки адекватности разработанной модели напряженно-деформированного состояния с реальными условиями in situ.

5. Дальнейшее развитие методологии геомеханического моделирования связано как с привлечением усложненных механических моделей и аппарата механики разрушения, так и с совершенствованием методики конечноэлементного моделирования. Проверка прочности сводится к оценке величины интенсивности напряжений, связанной с удельной потенциальной энергией пропорциональной интенсивности напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Морозов В. Н.*, *Татаринов В. Н.* Методика выбора участков земной коры для размещения экологически опасных отходов // Геоэкология. – 1996. – № 6. – С. 109–120.

2. *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, Vol. 2. No 1/2. – 2006. Pp. 65–74.

3. *Белов С. В.*, *Морозов В. Н.*, *Татаринов В. Н.*, *Камнев Е. Н.*, *Хаммер Й.* Изучение строения и геодинамической эволюции Нижнеканского массива в связи с захоронением высокоактивных радиоактивных отходов // Геоэкология. – 2007. – № 2. – С. 1–19.

4. *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.

5. *Морозов В. Н.*, *Колесников И. Ю.*, *Татаринов В. Н.* Моделирование уровней опасности напряженно-деформированного состояния в структурных блоках Нижнеканского гранитоидного массива (к выбору участков захоронения радиоактивных отходов) // Геоэкология. – № 6. – 2011. – С. 524–542.

6. *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.: Изд-во «Горная книга», 2011. – 592 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Морозов Владислав Николаевич[1] – доктор технических наук,
Батугин Андриан Серегеевич[2] – доктор технических наук,
МГИ НИТУ «МИСиС»,

Колесников Илья Юрьевич[1] – доктор физико-математических наук,
Татаринов Виктор Николаевич[1] – доктор технических наук,
Каган Александр Иосифович[1] – старший научный сотрудник,
Татаринова Татьяна Александровна[1] – старший научный сотрудник,
[1] Геофизический центр РАН.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 7, pp. 222–224.

UDC 621.039.
7:504

V.N. Morozov, A.S. Batugin, I.Yu. Kolesnikov, V.N. Tatarinov, A.I. Kagan, T.A. Tatarinova

PREDICTION OF GEODYNAMIC STABILITY OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT IN UNDERGROUND ISOLATION OF RADIOACTIVE WASTE

There are the results of predicting the stability of structural and tectonic crustal blocks when choosing locations isolation of high level radioactive waste. On an example Nizhnekanskiy granitoid massif, considered nowadays as the most likely place of burial of radioactive waste in Russia, shows a methodology for predicting the insulating properties of rock masses. Blocks with a high concentration of stress intensity are potentially dangerous for the development of tectonic destruction.

Key words:

AUTHORS

Morozov V.N.[1], Doctor of Technical Sciences,
Batugin A.S., Doctor of Technical Sciences, Mining Institute,
National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia,
Kolesnikov I.Yu.[1], Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Tatarinov V.N.[1], Doctor of Technical Sciences,
Kagan A.I.[1], Senior Researcher,
Tatarinova T.A.[1], Senior Researcher,
[1] Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, 119296, Moscow, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

Работа выполнена в рамках ГК Н.46.43.9Б.14.1059 от 28.03.2014.

REFERENCES

1. Morozov V. N., Tatarinov V. N. *Geoekologiya*. 1996, no 6, pp. 109–120.
2. 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*, Vol. 2. No 1/2. 2006. Pp. 65–74.
3. Belov S. V., Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kamnev E. N., Khammer Y. *Geoekologiya*. 2007, no 2, pp. 1–19.
4. Morozov V. N., Kolesnikov I. Yu., Belov S. V., Tatarinov V. N. *Geoekologiya*. 2008, no 3, pp. 232–243.
5. Morozov V. N., Kolesnikov I. Yu., Tatarinov V. N. *Geoekologiya*, no 6. 2011, pp. 524–542.
6. Anderson E. B., Belov S. V., Kamnev E. N., Kolesnikov I. Yu., Lobanov N. F., Morozov V. N., Tatarinov V. N. *Podzemnaya izolyatsiya radioaktivnykh otkhodov* (Underground isolation of radioactive waste), Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2011, 592 p.