

В.Н. Татаринов, В.Н. Морозов, А.И. Каган

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И НАПРАВЛЕНИЙ
ФИЛЬТРАЦИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД
ПРИ ВЫБОРЕ УЧАСТКОВ ДЛЯ ПОДЗЕМНОЙ
ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

Возможность использования геологических формаций для подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов (ВАО) является предметом острых дискуссий ученых. В России широко обсуждается идея изоляции ВАО в Нижнеканском массиве (Красноярский край). Для решения этой проблемы разработана технология прогнозирования стабильности геологической среды. Она основана на моделировании напряженно-деформированного состояния пород и направлений фильтрации подземных вод во времени. Прогнозируется опасность деструкции структурного блока земной коры, который может быть активирован геодинамическими процессами и вероятность проникновения подземных вод к контейнерам с ВАО.

Ключевые слова: высокоактивные радиоактивные отходы, напряженно-деформированное состояние, фильтрация подземных вод.

Введение

За период интенсивного развития атомной промышленности на территории России был накоплен огромный объем радиоактивных отходов активностью более $5,9 \times 10$ млрд. Кюри и объемом свыше 510 млн куб. м, 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 проблемы началось только в последние годы, когда в российском обществе и государственных органах сформировалось понимание того, что безопасность обращения с РАО является приоритетным условием дальнейшего развития атомной промышленности и экономики страны в целом. Наиболее токсичными и опасными являются тепловыделяющие высокоактивные радиоактивные отходы (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, который составляет 100 тыс. лет.

Обоснование пригодности геологической среды для захоронения ВАО важнейшая экологическая проблема, стоящая как перед Россией, так и другими развитыми странами, использующими ядерные технологии. 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 гг. принято решение о строительстве первого в России пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Красноярском крае. Итогом многолетних инженерно-геологических изысканий, которые проводились в пределах Нижнеканского массива, начиная с 1992 г., стал выбор участка «Енисейский», расположенного в пределах ЗАТО г. Железногорск, на котором ведутся детальные геолого-геофизические исследования.

Представление о том, что безопасность глубоких геологических формаций для захоронения ВАО должна оцениваться на срок сопоставимый со сроками радиобиологической опасности ВАО, имеет перед собой и этическое основание в виде принципа ответственности перед будущими поколениями, заложенное в документах МАГАТЭ и IAEA, и является предметом острых дискуссий ученых и специалистов. Методологически выбор площадок для захоронения ВАО основан на поиске в относительно стабильных районах наименее нарушенных структурно тектонических блоков максимальных размеров [1–2]. Экспертные оценки нынешнего «качества» участка, где предполагают построить могильник ВАО, не отвечают на фундаментальный вопрос: как тектоника повлияет на сохранность породного массива за 100 тыс. лет и более, пока будет существовать экологическая опасность радионуклидов. Наибольшую угрозу представляет образование новых или активизация старых тектонических разломов и проникновение поверхностных и грунтовых вод к контейнерам с ВАО с последующим выносом радионуклидов в среду обитания человека.

Основной принцип обеспечения безопасных захоронения РАО заключается в предупреждении образования зон опасных концентраций напряжений еще на стадии проектирования на основе геодинамического районирования. Необходимо прогнозировать эволюцию напряженно деформированного состояния (НДС), вмещающего породного массива как основного барьера, препятствующего распространению радионуклидов, и направлений возможного распространения радионуклидов подземными водами.

Результаты исследований

Нижнеканский гранитоидный массив (НКМ) находится в нескольких километрах от Красноярска. По данным геолого-геофизических и структурно-геоморфологических исследований, проведенных в западной части массива и частично во вмещающих породах, предварительно выбраны три участка для захоронения ВАО: «Каменный», «Итакский» и «Енисейский» [3].

Анализ геологических данных показывает, что НДС массива определяется, главным образом, сжимающими усилиями, ориентированными в юго-запад – северо-восточном направлении. Для моделирования напряженно-деформируемого состояния мы использовали упругую модель обобщенно плоского напряженного состояния [6]. В качестве метода вычислений использовался метод конечных элементов (МКЭ). Наделение конечных элементов различными механическими свойствами позволяет сформировать гетерогенную модель НКМ, которая отражает реальные свойства пород. На рис. 1 приведена структурная модель НКМ для моделирования распределения полей напряжений МКЭ. В модели были приняты следующие значения проекций на оси X и Y тектонических напряжений: субширотной $N_x = 30$ МПа и субмеридианальной $N_y = 10$ МПа. Эти величины близки к напряжениям в ненарушенных породах, измеренных в комплексе подземных выработок Горно-химического комбината

[4] на глубине до 400 м. Детально алгоритм и методика расчета полей напряжений изложены в [5, 6].

При анализе результатов моделирования в качестве обобщенного критерия уровня НДС локальных участков НКМ используется интенсивность напряжений σ_i , представленная в виде карты изолиний напряжений (рис. 2).

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; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$ – компоненты тензора напряжений.

Высокий уровень дифференциации распределения σ_i в пределах модели НКМ дает основание для выделения потенциально опасных зон (не пригодных для изоляции ВАО). 3D модель практически является основой для геодинамического районирования территории с целью выбора мест геологически безопасной подземной изоляции ВАО в геологических формациях.

Можно с уверенностью утверждать, что зоны концентрации σ_i являются возможными источниками крупномасштабной деструкции геологической среды в поле действующих тектонических напряжений.

Одна из главных угроз надежности могильника ВАО является проникновение грунтовых вод к контейнерам с последующим выносом радионуклидов в окружающую среду.

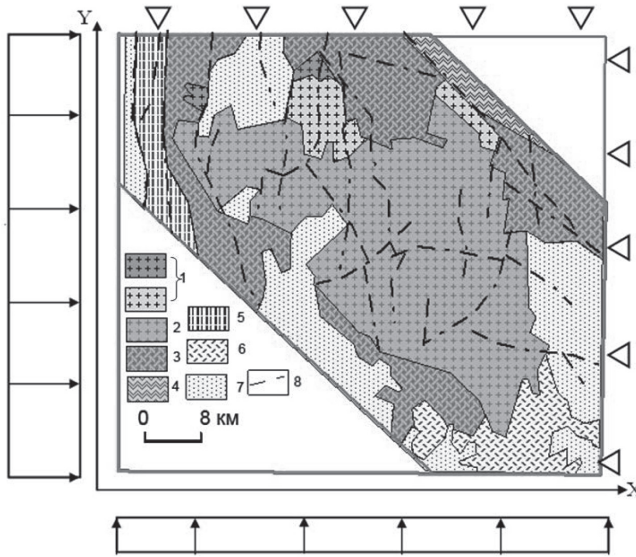


Рис. 1. Структурная модель для моделирования распределения полей напряжений МКЭ: 1, 2 – контур гранитоидов, отличающихся по упруго-прочностным свойствам; 3 – гнейсовый комплекс (AR); 4 – зоны милонитов; 5 – слюдяно-гнейсовый комплекс с амфиболитами, кварцитами и мраморами (AR – PR); 6 – терригенно-вулканогенные отложения (PZ₂); 7 – терригенные отложения (J); 8 – крупные тектонические разломы

Фильтрация через среду описывается законом Дарси:

$$V_x = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx}$$

где V_x – величина скорости фильтрации через пористую среду; k – проницаемость среды; μ – динамическая вязкость жидкости; P – давление.

Коэффициент k постоянен для данной жидкости, если пористая среда несжимаема и изотропна.

Для изотропной среды можно записать:

$$V = -\frac{k_0}{\mu} \nabla(P)$$

где V – вектор скорости фильтрации. Применяв операцию дивергенции получаем:

$$-\frac{k_0}{\mu} \nabla^2(P) = 0$$

Таким образом, фильтрация сквозь изотропные среды может быть сведена к решению уравнения Лапласа с соответствующими граничными условиями. Если распределение P известно, то скорости фильтрации могут быть получены из закона Дарси.

Во многих случаях пористая среда анизотропна и проницаемость зависит от направления течения. В этом случае уравнение можно записать в виде:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0$$

Таким образом, мы снова получили уравнение Лапласа. Следовательно, истинный физический случай можно представить как фиктивный изотропный в преобразованных координатах.

В соответствии с законом Дарси будем исходить из предположения, что скорость фильтрации в градиентном поле тектонических напряжений пропорциональна градиенту действующих напряжений:

$$\vec{V}_f = \begin{bmatrix} \vec{V}_x \\ \vec{V}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kE\nabla^2 U \\ kE\nabla^2 V \end{bmatrix}$$

в предположение некоторого постоянного коэффициента фильтрации k .

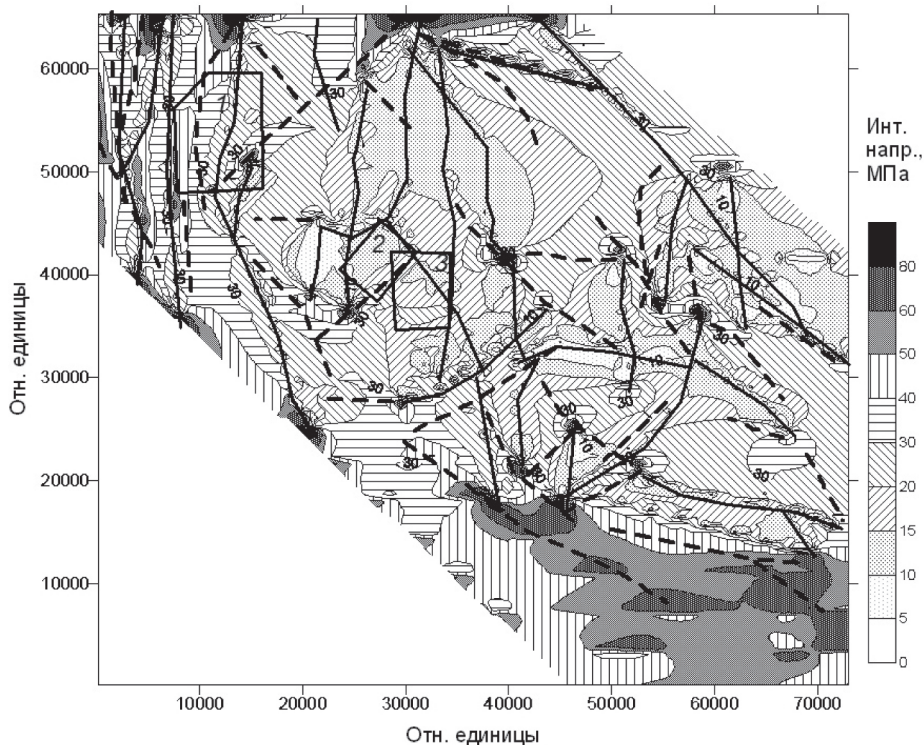


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений в районе НКМ по данным расчетов методом конечных элементов. Линиями показаны разломы. Прямоугольниками выделены участки детальных исследований: 1 – Енисейский, 2 – Игатский, 3 – Каменный

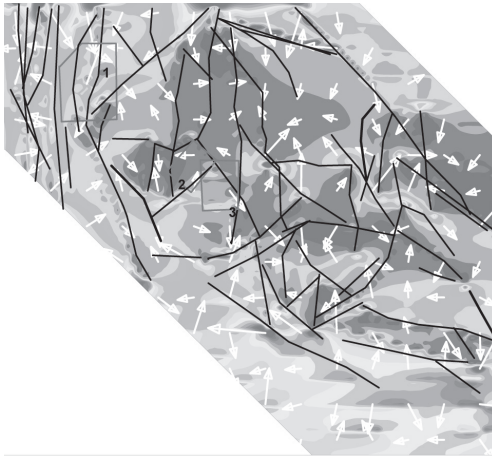


Рис. 3. Направление векторов скоростей фильтрации в районе Нижнеканского массива

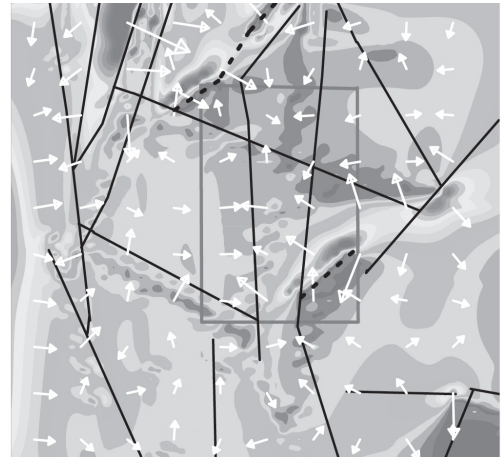


Рис. 4. Поле распределения интенсивности напряжения в районе участка «Енисейский» и вектора скоростей фильтрации

Скорость фильтрации, выраженная через компоненты напряжений, в условиях плосконапряженного состояния, имеет вид:

$$\vec{V}_f = \vec{V}_x + \vec{V}_y = kE(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$

Тогда используя эти соотношения, представляется возможность расчета и прогнозирования развития гидрогеологических условий в районе заложения могильника РАО при изменении НДС породного массива в результате прогнозируемой тектонической деструкции породного массива.

Обратим внимание, что вектор скоростей фильтрации ортогонален направлению действия сил, вызывающих компрессию вдоль соответствующих осей в выбранной системе координат.

Уровень напряженного состояния породного массива в его локальных зонах определен величиной интенсивности напряжений. Переход к интенсивности напряжения дает возможность строить модель фильтрации жидкости независимой от данной конкретной системы координат. Исходя из предположений, что скорость фильтрации определяется этой интегральной оценкой уровня действующих напряжений в элементе объема породного массива имеем:

$$\vec{V}_f = \text{grad}(\sigma_i)$$

Это упрощает расчеты первого приближения, поскольку задача оценки напряженного состояния и фильтрации решаются отдельно. В этом случае скорость фильтрации, как функция координат и времени $V(x, y, t)$ дает возможность оценок водопритоков в ослабленные зоны тектонической трещиноватости, как основу дальнейших расчетов скорости миграции и прогнозируемой миграции радионуклидов в процессах массопереноса.

На рис. 3 представлены расчеты векторов $\vec{G} = \left\langle \text{grad} \frac{\sigma_i}{2} \right\rangle$ градиентов действующих тектонических напряжений для массива НКМ. В настоящее время участок «Енисейский» является наиболее перспективным в плане создания могильника

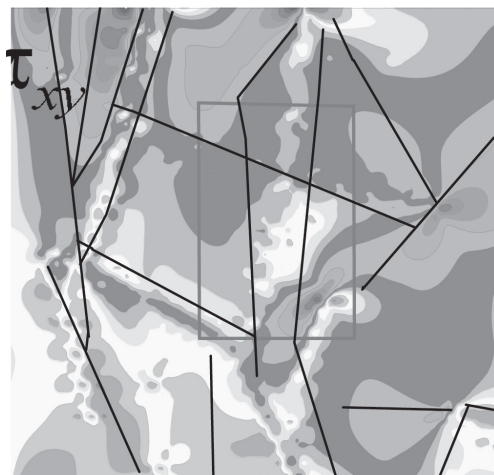


Рис. 5. Распределение касательных напряжений τ_{xy} на участке «Енисейский»

необходимо учитывать при оценке последующей экологической безопасности могильника ВАО.

При изменении тектонических напряжений разломы представляют собой каналы интенсивной фильтрации грунтовых вод, способствующие интенсивной миграции радионуклидов в геологической среде.

Выводы

Обобщая вышеизложенное, можно сделать следующие выводы и рекомендации по совершенствованию методики прогноза деструкции геологической среды применительно к задачам выбора наименее опасного участка для захоронения РАО:

1. Зоны высокой концентрации σ_1 являются зонами неустойчивого состояния геологической среды, в пределах которых наиболее вероятно развитие тектонической деструкции структурно-тектонических блоков с последующим разрушением искусственных и естественных изоляционных барьеров.

2. Необходимо учитывать общие фундаментальные закономерности связи между тектоническим напряжением и потенциальной угрозы массопереноса радионуклидов в процессе фильтрации грунтовых вод, при выборе участков размещения могильников ВАО.

3. Кинематические принципы тектонической деструкции геологической среды в сочетании с полученными значениями интенсивности напряжений и дают возможность построить прогнозную схему разрушения структурных блоков как последовательные итерации продвижения активных разломов с перераспределением полей напряжений и изменением характера НДС породных массивов, сопровождающимися изменением гидрогеологических условий выбранного участка.

4. Корректировка указанной модели возможна на основе наблюдений за современной активностью основных тектонических нарушений в пределах района радиусом до 30 км от центра выбранного участка с применением методов космической геодезии.

для ВАО. Исходя из этого, было проведено моделирование НДС в пределах участка «Енисейский». Граничные условия для этого моделирования взяты из модели для всего НКМ [6].

На рис. 4 представлены расчеты векторов скоростей фильтрации для участка «Енисейский». Вектора указывает наиболее вероятные направления фильтрации грунтовых вод под действием тектонических напряжений.

Исходя из этого, нами были определены два наиболее вероятных направления развития новых активных геодинамических зон, затрагивающих участок «Енисейский». Они показаны на рис. 4 пунктирными черными линиями. Это новые наиболее вероятные разломы в районе участка «Енисейский». Их

1. 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. – 2006. – No 1/2. – Pp. 65–74.
2. Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Методика выбора участков земной коры для размещения экологически опасных отходов // *Геоэкология*. – 1996. – № 6. – С. 109–120.
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. – № 3. – С. 227–238.
4. 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.
5. Морозов В.Н., Колесников И.Ю., Белов С.В., Татаринов В.Н. Напряженно-деформированное состояние Нижнеканского гранитоидного массива – района возможного захоронения радиоактивных отходов // *Геоэкология*. – 2008. – № 3. – С. 232–243.
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.: Издательство «Горная книга», 2011. – 592 с.: ил. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Татаринов Виктор Николаевич – доктор технических наук, зав. лабораторией, e-mail: v.tatarinov@gcras.ru,
 Морозов Владислав Николаевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, e-mail: v.morozov@gcras.ru,
 Каган Александр Иосифович – старший научный сотрудник, e-mail: a.kagan@gcras.ru, Геофизический центр Российской академии наук.

UDC 622.504

MODELING STRESS AND FILTRATION OF GROUNDWATER BY SELECTING SITES FOR UNDERGROUND DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE

Tatarinov V.N., Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory, e-mail: v.tatarinov@gcras.ru,
 Morozov V.N., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, e-mail: v.morozov@gcras.ru,
 Kagan A.I., Senior Researcher, e-mail: a.kagan@gcras.ru,
 Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences.

The possibility of using deep geological formations to dispose of high-level radioactive waste (HLRW) is a subject raising heated debate among scientists. In Russia, the idea of constructing HLRW repository in the Nizhnekansky massif (Krasnoyarsk area) is widely discussed. To solve this problem we are elaborating a technology associated with time – space stability prediction of the geological environment, which is subject to geodynamic processes evolutionary effects. It is based on the prediction of isolation properties stability in a structural tectonic block of the Earth's crust for a given time. The danger is in the possibility that the selected structural block may be broken by new tectonic faults or movements on a passive fault may be activated and thus underground water may penetrate to HLRW containers.

Key words: filtration of underground water, stress-strain state, high-level radioactive waste.

REFERENCES

1. 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, 2006, no 1/2, pp. 65–74.
2. Morozov V.N., Tatarinov V.N. *Geoekologija*, 1996, no 6, pp. 109–120.
3. Belov S.V., Morozov V.N., Tatarinov V.N., Kamnev E.N., Hammer J. *Geoekologija*, 2007, no 3, pp. 227–238.
4. Morozov V.N., Gupalo T.A., Tatarinov V.N. *Gornyy vestnik*, 1999, no 6, pp. 99–105.
5. Morozov V.N., Kolesnikov I.Ju., Belov S.V., Tatarinov V.N. *Geoekologija*, 2008, no 3, pp. 232–243.
6. Anderson E.B., Belov S.V., Kamnev E.N., Kolesnikov I.Ju., Lobanov N.F., Morozov V.N., Tatarinov V.N. *Podzemnaja izoljacija radioaktivnyh othodov* (Underground sealing of radioactive waste), Moscow, Izdatel'stvo «Gornaja kniga», 2011, 592 p.