

УДК 621.039

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НИЖНЕКАНСКОГО МАССИВА КАК ВОЗМОЖНОГО МЕСТА ПОДЗЕМНОЙ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

© 2009 В.Н. Морозов¹, И.Ю. Колесников¹, В.Н. Татаринов^{1,2}, Т.А. Татаринова²

¹Геофизический центр РАН; e-mail: vtatarinov@gcras.ru

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Изложены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния Нижнеканского гранитоидного массива (Енисейский кряж), который рассматривается в качестве потенциального объекта захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (ВАО). Для расчетов использована многокомпонентная структурно-тектоническая модель массива. Показано, что структурные блоки с высокой концентрацией интенсивности напряжений потенциально опасны с позиции возможной тектонической деструкции на время экологической опасности ВАО, составляющее более 100 тыс. лет. Использование комплекса методов анализа геолого-геофизических данных, палеотектонической реконструкции напряжений и тектонофизического моделирования расширяют возможности прогнозирования устойчивости геологической среды на длительные периоды времени и позволяют более достоверно оценить положение возможных зон деструкции породных массивов и выбрать наименее опасный с геодинамической точки зрения участок для подземной изоляции ВАО.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, Нижнеканский массив, высокоактивные радиоактивные отходы.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие ядерной энергетики в России невозможно без решения проблемы захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в глубокие геологические формации. Выбор участков для экологически безопасной подземной изоляции отверженных ВАО по-прежнему остается одной из серьезных проблем для государств, использующих атомную энергию, среди которых находится и Россия. Несмотря на рекомендации МАГАТЭ, у нас в настоящее время отсутствует четкая методологическая основа для селекции таких участков. 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.

При прогнозе стабильности геологической среды ее эволюция должна рассматриваться с позиции потери изоляционных свойств породных массивов как основного барьера, пре-

пятствующего проникновением поверхностных и грунтовых вод к контейнерам с последующим выносом радионуклидов в окружающую среду (Андерсон и др., 1999; Кедровский и др., 1991; Лаверов и др., 2002; Чесноков и др., 2005).

Это в полной мере относится к Нижнеканскому гранитоидному массиву (рис. 1), расположенному на правом берегу р. Енисей севернее г. Красноярска, который в настоящее время рассматривается в качестве наиболее вероятного места захоронения ВАО в России, и является предметом широкой дискуссии российских ученых и специалистов (Белов и др., 2007; Морозов и др., 2008; Морозов, Татаринов, 2004; Лаверов и др., 2002; Старостин и др., 1995).

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ НИЖНЕКАНСКОГО МАССИВА

Нижнеканский гранитоидный массив (НКМ) располагается в южной части Енисейского кряжа в пределах юго-западной оконечности Ангаро-Канского антиклинория. Эта часть кряжа сложе-

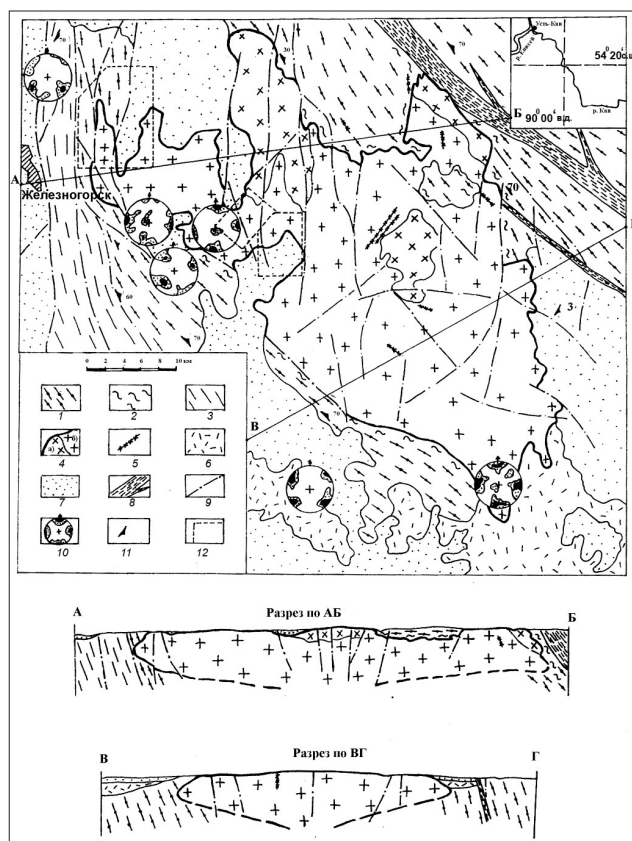


Рис. 1. Схема геологического строения НКМ. 1 – гнейсовый комплекс (AR); 2 – приконтактовая мигматизация; 3 – слюдяно-гнейсовый комплекс с амфиболитами, кварцитами и мраморами (AR – PR); 4 – контур гранитоидов НКМ: а – диориты и гранодиориты 1-й фазы, б – граниты и лейкограниты 2-й фазы; 5 – дайки кислого состава; 6 – терригенно-вулканогенные отложения (PZ2); 7 – терригенные отложения (J); 8 – зоны мионитов; 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»).

на глубоко метаморфизованными отложениями и интрузивными породами и является древней архейской глыбой в пределах складчатой системы байкалид. В тектоническом отношении он приурочен к узлу сочленения древней Сибирской платформы, молодой Западно-Сибирской плиты и Западно-Саянской орогенической области.

Массив представляет собой сложное интрузивное тело, вытянутое в северо-западном направлении в соответствии с доминирующим простиранием докембрийских вмещающих толщ и занимает ядро антиклинального поднятия. По данным гравиметрии (Андерсон и др., 1999) его вертикальная мощность колеблется от 5–6 км в западной части до 7–8 км на востоке.

В целом НКМ имеет форму неправильного

опрокинутого конуса с корневой ножкой, находящейся в пределах восточной наиболее возвышенной части массива, где мощность гранитов превышает 8 км. На глубине интрузия протягивается далее на юго-восток под трансгрессивно перекрывающими ее отложениями Рыбинской впадины. Площадь массива с учетом погребенной части составляет около 3500 км². Главный интрузив связан с рядом небольших послойных и секущих тел. В пределах экзоконтакта НКМ преимущественно развиты архейские отложения представленные породами амфиболитовой и гранулитовой фаций метаморфизма (Волобуев и др., 1980). Непосредственно с массивом породы более древней атамановской толщи контактируют на юго-западе, северо-востоке и частично на севере. В составе атамановской толщи принимают участие кордиеритовые, кордиерит-силлиманитовые и гранат-кордиеритовые гнейсы. На севере и северо-западе выше по разрезу залегают породы калантатской толщи, в которой выделяются две пачки: нижняя – кварцитовидные гнейсы с прослоями биотитовых гнейсов и амфиболитов, и верхняя, представленная чередованием пластов биотитовых и кварцитовидных гнейсов. На юге массив перекрывается терригенно-вулканогенными отложениями среднего палеозоя. В области северного, юго-западного и восточного экзоконтактов НКМ распространены также юрские терригенные отложения.

Особенности разломной тектоники этой части Енисейского кряжа обусловлены наличием близмеридиональных надвигов с крутым падением сместителей в восточных румбах, которые на глубине выполаживаются и приобретают характер листрических разломов (Даценко, 1984, 1995). В области развития гнейсовых толщ экзоконтакта НКМ подобные дизъюнктивные нарушения находятся в юго-восточной части площади. Помимо таких крупных разломных зон имеются системы разломов диагонального и ортогонального простирания. Большинство этих разломов прямолинейны и субвертикальны. Их длина колеблется от 5 до 20 км. Среди них имеются сбросы и взбросы. Для западной половины района характерна система субмеридиональных разломов (Правобережный, Большой Тельский, Малый Тельский, Большой Итатский, Канско-Енисейский и др.), которые формируют серию вытянутых в субмеридиональном направлении узких монолитных тектонических блоков, образующих ступенчато-клавишную структуру (Лобацкая, 2005).

Характерная тектоническая позиция массива в ядерной части крупной Южно-Енисейской антиклинали, вытянутость его длинной оси согласно простиранию докембрийских толщ, конформность его контактов с вмещающими поро-

дами, наличие развитых по контакту, теневых мигматитов свидетельствуют об синорогенном, анатектическом характере этого интрузива.

Анализ истории развития структуры показал (Белов и др., 2007), что в период формирования НКМ ось максимального сжатия σ_3 была субгоризонтальна и ориентирована с северо-востока на юго-запад под углом около 40° , ось σ_2 также располагалась горизонтально и была параллельна генеральному северо-западному простиранию докембрийских толщ, а ось σ_1 имела субвертикальную ориентировку. В ходе дальнейшей геологической истории рассматриваемая территория развивалась в тесной связи с геодинамической эволюцией древней платформы. На основании анализа морфологии и простираний складок было установлено, что вектор сжимающих напряжений и ось σ_3 были ориентированы в западно-юго-западных румбах ($240-260^\circ$), а тектонические усилия исходили со стороны жесткого основания Сибирской платформы. Позднее в мезозое вектор тектонических сжимающих усилий лишь слабо развернулся к югу и ось σ_3 также была видимо ориентирована в западно-юго-западных румбах ($230-240^\circ$). Сейсмотектонические данные также свидетельствуют о доминирующих напряжениях субгоризонтального сжатия, ориентированных в северо-восточном направлении в позднеплейстоценовое и голоценовое время.

Таким образом, из геологических данных следует, что напряженно-деформированное состояние (НДС) массива определяется, главным образом, сжимающими усилиями, ориентированными в юго-запад — северо-восточном направлении поперек общего простирания жесткой глыбы Енисейского кряжа.

КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ МАССИВА

Надежность моделирования НДС в большей степени обуславливается соблюдением условий подобия. В нашем случае одним из важных обстоятельств является геометрическое подобие структурно-тектонической модели реальной структурной нарушенности среды, отраженной на геологической карте (Белов и др., 2007). Для реализации этого условия на основании особенностей геологического строения была построена структурно-тектоническая модель района НКМ (рис. 2) (Морозов и др., 2008). Ее особенностью является то, что контакты массива и границы разновозрастных толщ, а также линии наиболее крупные разломы аппроксимированы прямолинейными отрезками (мелкие разломы не учитывались). Разломы задавались в следующем виде: брались координаты начала и конца разлома с карты и для тех конечных элементов, которые

данный разлом пересекал, задавались заведомо более низкие физико-механические свойства (таблица), чем в окружающем их массиве. Схематично разлом представлялся в виде ступенчатой зоны из конечных элементов (рис. 2).

Вторым важным фактором соблюдения подобия модели является соответствие ориентировки главных усилий в модели и полученных при расшифровке истории геодинамической эволюции территории. Как отмечено выше, вектор тектонических сжимающих усилий (ось σ_3) был ориентирован по азимуту $230-240^\circ$. Такое исходное региональное поле тектонических напряжений с соответствующей ориентировкой траекторий главных усилий использовалось в качестве одного из граничных условий. В моделях 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, замеренных *in situ* в подземных выработках ГХК (Морозов и др., 1999) на глубинах до 400 м.

Для описания НДС мы использовали упругую модель обобщенного плоского напряженного состояния. В трехмерном массиве горных пород выделен слой, толщина которого мала по сравнению с протяженностью массива. Кинематические граничные условия соответствуют условиям закрепления, при которых не допускаются перемещения в направлениях, нормальных

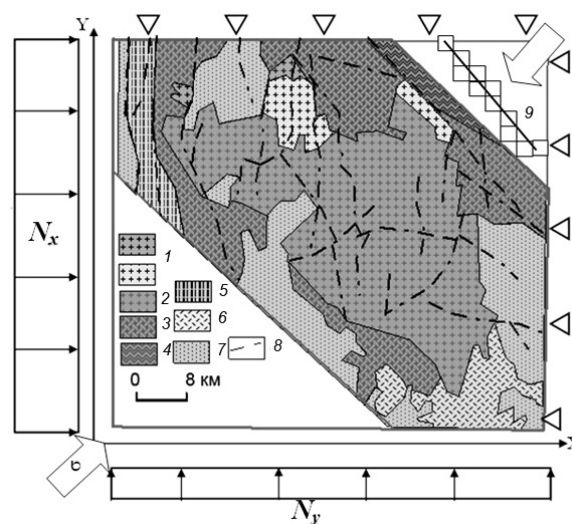


Рис. 2. Структурная модель НКМ для моделирования распределения полей напряжений методом конечных элементов. 1-2 — контур гранитоидов, отличающихся по упруго-прочностным свойствам; 3 — гнейсовый комплекс (AR); 4 — зоны милонитов; 5 — слюдяно-гнейсовый комплекс с амфиболитами, кварцитами и мраморами (AR — PR); 6 — терригенно-вулканогенные отложения (PZ₂); 7 — терригенные отложения (J); 8 — крупные тектонические разломы; 9 — показан пример (в увеличении) задания разлома конечными элементами.

к контуру. Такой вид закрепления обеспечивает выполнение условий статического равновесия и исключения перемещений массива как жесткого целого. Выбор указанных граничных условий позволяет выявлять зоны концентрации напряжений, обусловленные характерными для геологической среды структурными неоднородностями. Моделирование разломных участков осуществлялось на основе присущего разломам ослабления механической сопротивляемости материала. Разломы характеризуются заполнением материалом с гораздо меньшей прочностью и большей деформированностью.

Таким образом, при моделировании НДС, его структура представляется двумя типами неоднородностей:

1. Разломами, характеризуемыми модулем упругости – E_p ; коэффициентом Пуассона – ν_p .

2. Фрагментарными комплексами пород, характеризуемыми модулем упругости – E_f ; коэффициентом Пуассона – ν_f .

Сетка конечных элементов была выбрана из соображений учета ширины зон динамического влияния основных разломов, которая по данным исследований Радиевого института им. В.Г. Хлопина (Андерсон и др., 1999) составляет около 300 метров. Была задана сетка по 200 конечных элементов в обоих направлениях (рис. 2), т.е. размер ячейки приблизительно составлял 300×300 м.

Параметры расчетной конечноэлементной модели:

1) число конечных элементов – 40000;

2) число степеней свободы (узловых перемещений) – 80802;

3) ширина ленты глобальной матрицы жесткости – 406.

Механические характеристики основных типов пород, полученные на основе физико-меха-

нических испытаниях образцов горных пород приведены в таблице. Они получены как обобщение данных из отчетов об испытаниях образцов пород, выполненных на Горно-Химическом комбинате сотрудниками ВНИПИПромтехнологии.

Расчет НДС производился в форме перемещений на основе четырехугольных изопараметрических конечных элементов. Выбор метода вычислений обусловлен как физическими соображениями (обеспечением условия минимальности полной потенциальной энергии деформации для всего массива), так и эффективностью его компьютерной реализации. Использовалась равномерная сетка.

Перемещения в направлении координатных осей выражаются билинейными представлениями:

$$u = \sum_{j=1}^4 f_j(\zeta, \eta) U_j; v = \sum_{j=1}^4 f_j(\zeta, \eta) V_j, \quad (1)$$

где u и v – перемещения вдоль осей x и y декартовой системы координат; U_j и V_j – искомые значения перемещений в узлах изопараметрического конечного элемента; ζ, η – декартовы координаты в вычислительной плоскости.

Отображение вычислительного квадрата в изопараметрический конечный элемент записывается аналогичным образом (Секулович, 1993):

$$x = \sum_{j=1}^4 f_j(\zeta, \eta) X_j; y = \sum_{j=1}^4 f_j(\zeta, \eta) Y_j, \quad (2)$$

где x, y – декартовы координаты точек конечного элемента в физической плоскости; X_j, Y_j – декартовы координаты вершин четырехузлового конечного элемента.

Соотношения между напряжениями и деформациями (под которыми понимаются их усредненные на толщину значения) согласно модели обобщенного плоского напряженного

Физико-механические свойства основных типов пород НКМ

№ п/п	Типы пород	Модуль упругости, $E \times 10^{-5}$, МПа	Коэффициент Пуассона, ν	Предел прочности пород на сжатие, $\sigma_{сж}$, МПа	Предел прочности пород на растяжение, σ_p , МПа
1	Гранодиориты и диориты НКМ (1 фаза)	0.747	0.23	157	20
2	Граниты и лейкограниты НКМ (2 фаза)	0.659	0.21	150	28
3	Гнейсы, мигматиты (AR)	0.787	0.22	117	19
4	Милониты в зоне регионального разлома	0.33	0.19	120	15
5	Слюдистые сланцы, амфиболиты (PR)	0.678	0.24	158	22
6	Вулканогенно-терригенные породы (PZ)	0.47	0.16	120	14
7	Терригенно-карбонатные породы (J)	0.26	0.20	102	15
8	Разломы	0.005	0.15	- не определялись?	- не определялись?

состояния имеют вид:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = [D(E^{(m)}, \nu^{(m)})] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$ – компоненты тензора напряжений для плоского напряженного состояния, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$ – соответствующие им компоненты тензора деформаций,

$$[D(...)] = E^{(m)} / [1 - (\nu^{(m)})^2] \times \begin{bmatrix} 1 & \nu^{(m)} & 0 \\ \nu^{(m)} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \nu^{(m)})/2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $E^{(m)}$ – модуль упругости, $\nu^{(m)}$ – коэффициент Пуассона.

Здесь верхний индекс отражает неоднородность свойств отдельных конечных элементов.

Локальная матрица жесткости $k_{ij}^{e,(m)}$ записывается в стандартной форме:

$$[k_{ij}^{e,(m)}] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 h [\beta_i]^T [D(E^{(m)}, \nu^{(m)})] \times [\beta_j] \det[J] d\zeta d\eta, \quad (5)$$

где h – толщина слоя, $[\beta_{i(j)}]$ – типовая подматрица

производных функций формы, $\det [J]$ – определитель матрицы Якоби.

Глобальная система линейных алгебраических уравнений для всего массива имеет вид

$$[K_j] \vec{U} = \vec{F}; [K_j] = \sum_{e=1}^N [k_j^{e,(m)}], \quad (6)$$

где $[K_j]$ – глобальная матрица жесткости, $\vec{U}$ – вектор узловых перемещений, $\vec{F}$ – вектор эквивалентных узловых сил, N – число конечных элементов.

Величина интенсивности напряжений σ_i вычисляется по формуле (Писаренко и др., 1988):

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (7)$$

Приведенное выражение для интенсивности напряжений служит мерой накопленной в материале при деформировании удельной потенциальной энергии формоизменения.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

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. 3) или объемной модели.

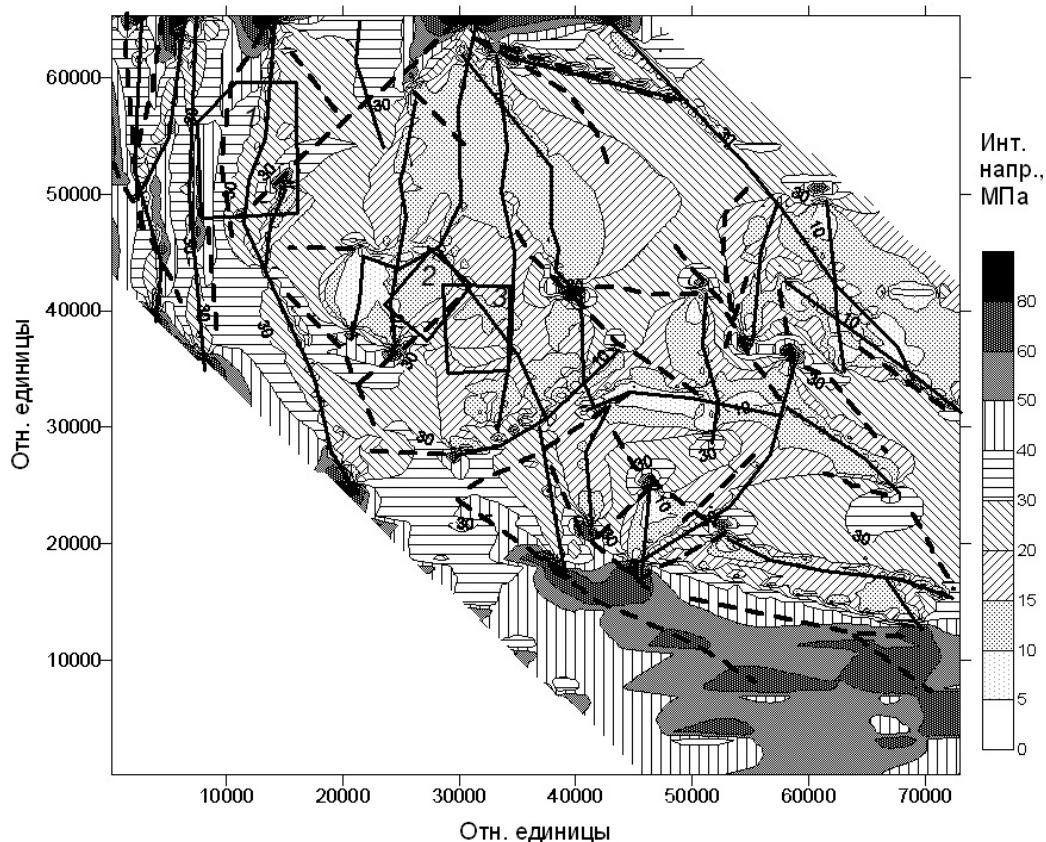


Рис. 3. Распределение интенсивности напряжений σ_i в районе НКМ по данным моделирования методом конечных элементов. Линиями показаны разломы, которые были учтены при моделировании, пунктиром прогнозируемые геодинамические зоны. Прямоугольниками выделены участки детальных исследований: 1 – Енисейский,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

При анализе результатов рассматривалось также распределение сдвиговой компоненты напряжений τ_{xy} (рис. 4). Анализ показал, что на участках, примыкающих к тектоническим разломам, и особенно на их концах, наблюдается значительная концентрация интенсивности напряжений, а вот эффект от дифференциации физико-механических свойств отдельных блоков в моделях проявляется крайне слабо.

С учетом свойств горных пород интенсивность напряжений в массиве на ненарушенных участках составляет в среднем 26 МПа. На отдельных локальных участках массива расчетные значения σ_i превышают 80-100 МПа, а в зонах разгрузки имеют величину менее 26 МПа. Высокий уровень дифференциации распределения σ_i в пределах модели НКМ дает основание для выделения потенциально опасных зон (не пригодных для изоляции ВАО). Разумеется, это уместно в случае адекватности реальной структурно-тектонической модели массива и заданных граничных условий. Обратим внимание, что предметом анализа является НДС внутри массива, имеющиеся краевые эффекты вызваны

условным ограничением протяженности разломов в сплошной среде на границе с массивом.

Таким образом, в рамках принятых ограничений, полученные локальные зоны концентрации σ_i являются возможными источниками крупномасштабной деструкции геологической среды в поле действующих тектонических напряжений. Важным моментом является скорость развития тектонического процесса, то есть скорость накопления напряжений в потенциально опасных зонах. Можно допустить, что деструкция среды реализуется при величине накопленной энергии свыше 10^3 эрг/см³. В этом случае, исходя из накопленного уровня упругой энергии и скорости прироста напряжений, можно оценить время возможного дальнейшего образования разломов.

Граничные условия можно было бы задать, исходя из знания компонент смещений, которые в настоящее время отсутствуют. Однако имеется возможность косвенной оценки времени образования разломов в массиве, используя оценку сейсмической опасности района. Исходя из предложения о возможности 6 бального земле-

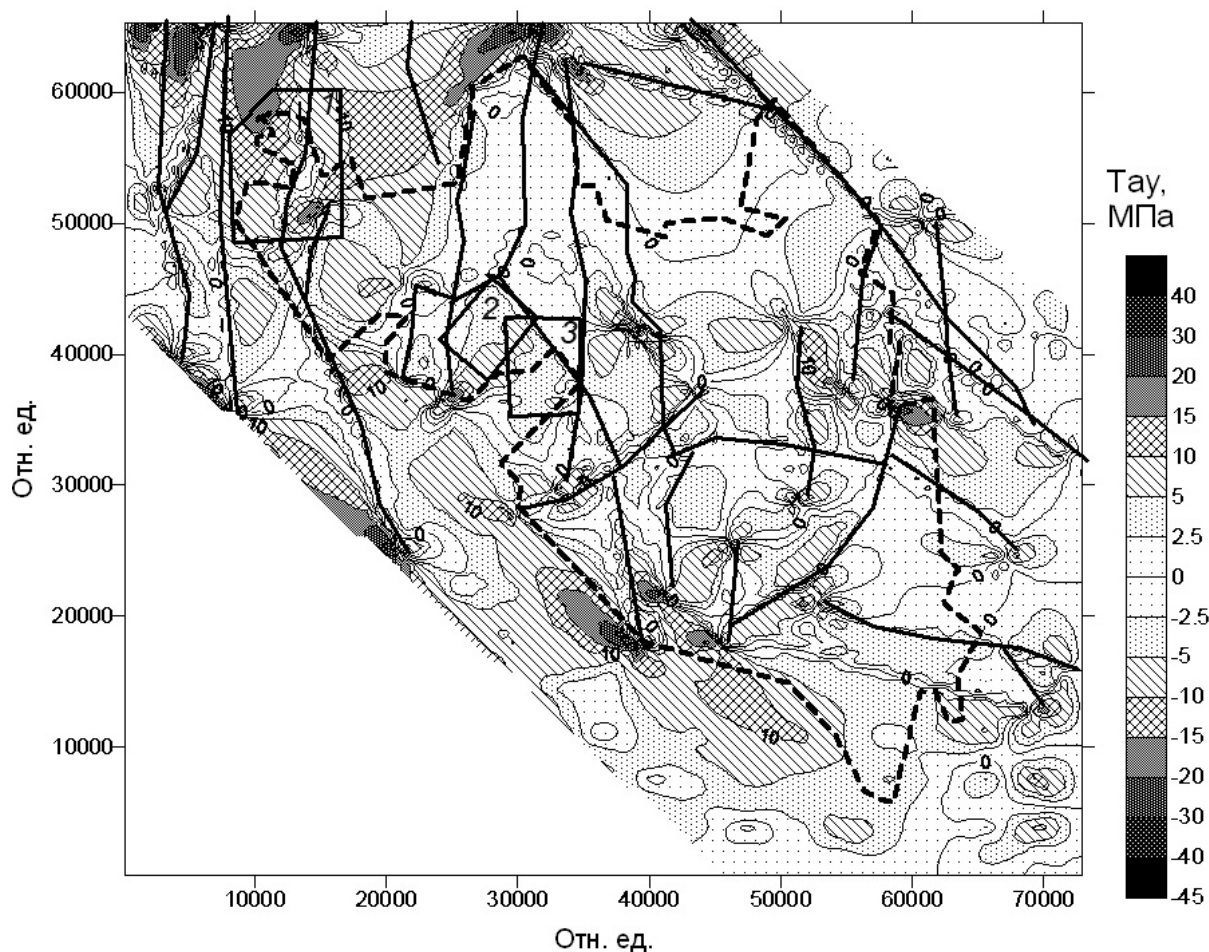


Рис. 4. Распределение сдвиговой компоненты напряжений τ_{xy} в районе НКМ по данным моделирования методом конечных элементов. Пунктиром показан контур НКМ. Прямоугольниками выделены участки детальных исследований: 1 – Енисейский, 2 – Итатский, 3 – Каменный.

трясения в пределах НКМ один раз в 500 лет, можно допустить, что длина вновь образованного разлома поверхностного землетрясения будет равна 2–5 км. Тогда аномальная концентрация σ_i с занимаемой площадью более 12 км² способна вызвать тектоническую подвижку с интенсивностью ~ 6 баллов с указанной вероятностью. В этом случае для выбора безопасной площадки для могильника необходима последовательная операция, моделирующая реализацию геодинамического процесса как последовательных актов деструкции тектонических блоков в пространстве и времени.

Рассматривая полученные результаты как первый шаг к возможной реализации совместных моделей деструкции породных массивов с моделями фильтрационных процессов, обратим внимание и на необходимость прогноза устойчивости СТБ в изменяющемся поле тектонических напряжений, содержащем инородное тепловыделяющее тело — собственно могильника ВАО в виде совокупности протяженных подземных выработок, заполненных контейнерами с ВАО. Ситуация осложняется, когда площадь могильника сопоставима с площадью выбранного структурно-тектонического блока.

В моделях поля интенсивности напряжений и касательных напряжений образуют систему линейно вытянутых зон, ориентированных в основном в северо-восточном — юго-западном и северо-западном — юго-восточном направлениях, что соответствует изложенной выше гипотезе об ориентации главных напряжений. В принципе эти участки могут быть геодинамическими зонами, в которых наиболее вероятно развитие процесса разрушения СТБ. Утверждать о количественных характеристиках полей напряжений нет оснований, но выделение местоположения возможных участков деструкции НКМ может считаться корректным.

В целом в распределении полей напряжений можно отметить следующие особенности. Система линейно-вытянутых зон прогнозируемых новых геодинамических зон, проводимых по направлениям вытянутых аномалий значений σ_i и τ_{xy} , преимущественно ориентирована под углом около 45° к направлению действия главных напряжений. Влияние гетерогенности упругих свойств горных пород на моделируемое поле напряжений существенно ниже, чем влияние разрывных нарушений.

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ НИЖНЕКАНСКОГО МАССИВА ПО СТЕПЕНИ УСТОЙЧИВОСТИ

Стратегия прогноза устойчивости участков НКМ предполагает сопоставление характеристик вычисленного НДС с некоторыми допускаемым

для данных пород прочностными критериями. Для этого нами использовалось одно из употребляемых в геомеханике энергетических предположений: *разрушение структурного блока, находящегося в сложном напряженном состоянии, происходит тогда, когда удельная потенциальная энергия изменения его формы достигает предельной величины, соответствующей пределу прочности пород.*

При объемном напряженном состоянии удельная энергия формоизменения (U_ϕ) определяется следующим выражением:

$$U_\phi = \frac{1 + \nu_{cp}}{3E_{cp}} \sigma_i^2, \quad (8)$$

где σ_i — интенсивность напряжений; ν_{cp} — среднее значение коэффициента Пуассона; E_{cp} — средний модуль упругости.

Исходя из этого, проверка прочности структурного блока сводилась к сравнению пределов прочности пород, установленных по лабораторным испытаниям, и интенсивности напряжений — σ_i , квадрат которой является эквивалентом удельной потенциальной энергии формоизменения среды

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2)} \leq [\sigma], \quad (9)$$

$[\sigma]$ — допускаемое напряжение.

Как видно, допускаемое напряжение было принято нами с большим запасом, т.к. в настоящее время нет информации об эффективной прочности породного массива в макроскопическом масштабе. Это как бы оценка прочности «сверху».

Прогноз разрушения можно также вести и по деформационному критерию, однако надежных данных о скоростях горизонтальных современных движений земной коры (СДЗК) в районе нет. В зоне Муратовского разлома зарегистрирован подъем восточного крыла со скоростью 0.2–3.0 мм/год и опускание западного со скоростью 2.8–3.6 мм/год. В районе ГХК за период 1972–1998 гг. скорости вертикальных СДЗК составили $+2.0 \pm 0.08$ мм/год. Максимальные деформации для скальных пород $\dot{\epsilon}^{\max} = 2 \times 10^{-4}$, в горной практике принимаются следующие: для условий одноосного сжатия — $\dot{\epsilon}^{\max} = 3 \times 10^{-5}$, а всестороннего сжатия — $\dot{\epsilon}^{\max} = 3 \times 10^{-6}$. Для использования этого критерия планируется постановка в регионе и на участке «Енисейский» GPS-наблюдений.

На карте распределения σ_i (рис. 3) линиями показано положение разломов, которые учитывались при моделировании, а пунктиром прогнозируемые новые геодинамические зоны, положения которых получены на основе анализа карт распределения τ_{xy} и σ_i . В строгом смысле это не новые разломы, а наиболее вероятные

направления возможного развития новых геодинамических зон, которые могут сформироваться в процессе дальнейшей тектонической эволюции региона.

На рис. 5 приведены результаты районирования массива по параметру «вероятного разрушения» ($P_{разр}$), равной отношению интенсивности напряжений к пределу прочности пород:

$$P_{разр} = [\sigma] / \sigma_{кр}, \quad (10)$$

где $\sigma_{кр} = k_{осл} \cdot \sigma_{сж}$, $k_{осл}$ – коэффициент структурного ослабления пород.

Коэффициент структурного ослабления принят 0.58, что соответствует значению $\sigma_{кр}$ близкой к 80 МПа для прочных ненарушенных гранитов. В соответствии с этим, были установлены следующие группы устойчивости для пород НКМ по «вероятному разрушению»:

$0 < P_{разр} < 0.25$ – массив устойчив, находится в наиболее благоприятных условиях;

$0.25 < P_{разр} < 0.75$ – массив находится в зоне возможных концентраций напряжений;

$P_{разр} > 0.75$ – массив, находится в неблагоприятных условиях, которые могут привести к деструкции структурных блоков в процессе их тектонической эволюции.

Из рисунка видно, что практически вся площадь участка «Енисейский» попадает в группу 2, а площадь участка «Каменный» в группу 1, обладающую наибольшей устойчивостью.

ВЫВОДЫ

Обобщая вышеизложенное, можно сделать следующие выводы и рекомендации по совер-

шенствованию методики прогноза деструкции геологической среды применительно к задачам выбора наименее опасного участка для захоронения отверженных высокоактивных радиоактивных отходов:

1. Зоны высокой концентрации σ_i 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. Кинематические принципы тектонической деструкции геологической среды в сочетании с полученными значениями σ_i дают возможность построить прогнозную схему разрушения структурных блоков как последовательные итерации продвижения активных разломов с перераспределением полей напряжений и изменением характера НДС породных массивов.

3. Полагая, что НДС определяется унаследованной тенденцией в развитии тектонического процесса и деформации массива в период от 1 млн. лет до настоящего времени, и то, что эта тенденция сохраняется на период времени $> 10^4$ лет, появляется возможность оценки скорости роста σ_i , а следовательно, оценки времени возможной деструкции геологической среды, на основе использования геологической информации.

4. Корректировка указанной модели возможна на основе наблюдений за современной активностью основных тектонических нарушений в пределах района радиусом до 60 км от центра Нижнеканского массива с применением

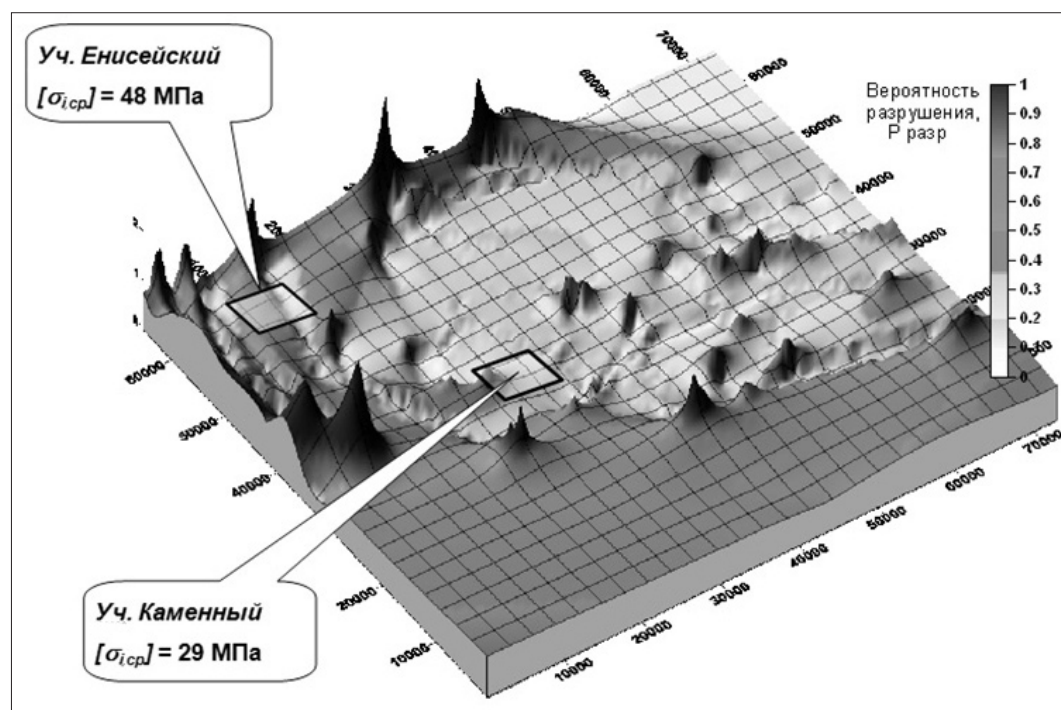


Рис. 5. Диаграмма оценки устойчивости района НКМ по величине $P_{разр}$.

современных спутниковых навигационных систем (GPS и ГЛОНАСС).

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 квадрату интенсивности напряжений. Получение более надежного ответа, включая рассмотрение энергетического подхода к процессу разрушения, требует привлечения аппарата физики твердого тела и теории механики разрушения. Такой подход планируется развить в дальнейшем.

Список литературы

- Андерсон Е.Б., Любцева Е.Ф., Оганезов А.В. и др.* Геофизические исследования Енисейского кряжа с целью поисков участков захоронения ВАО // Разведка и охрана недр. 1999. № 9-10. С. 61-63.
- 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. № 3. 2007. С.227-238.
- Волобуев М.И., Зыков С.Н., Ступникова Н.И., Стрижов В.П.* Свинцово-изотопная геохронология докембрийских метаморфических комплексов юго-западного обрамления Сибирской платформы. Геохронология Восточной Сибири и Дальнего востока. М.: Наука, 1980. С. 14-30.
- Даценко В.М.* Гранитоидный магматизм юго-западного обрамления Сибирской платформы. Новосибирск: Физматлит, 1984. 120 с.
- Даценко В.М.* Нижнеканский массив – эталон нижнеканского гранитоидного комплекса (Енисейский кряж). Новосибирск: Наука, 1995. 120 с.
- Кедровский О.Л., Шищиц И.Ю., Леонов Е.А., Гупало Т.А. и др.* Обоснование условий локализации высокордиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива в геологических формациях // Атом. энергия. 1991. Т. 70. № 5. С. 294-297.
- Лаверов Н.П., Петров В.А., Величкин В.И. и др.* Петрофизические свойства гранитоидов Нижнеканского массива: к вопросу о выборе участков для изоляции ВАО и ОЯТ // Геоэкология. 2002. № 4. С. 293-310.
- Лобацкая Р.М.* Неотектоническая разломно-блоковая структура зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 2. С. 141-151.
- 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.
- 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.
- Морозов В.Н., Татаринов В.Н.* От экспертных оценок к прогнозированию развития во времени тектонических процессов в районах захоронения ВАО // VII междунар. конф. «Безопасность ядерных технологий. Обращение с радиоактивными отходами» М.: Про Атом, 2004. С. 331-339.
- Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.* Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова Думка, 1988. 736 с.
- Секулович М.* Метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1993. 664 с.
- Старостин В.И., Величкин В.И., Петров В.А. и др.* Структурно-петрофизические и геодинамические аспекты выбора массивов кристаллических пород в связи с проблемами захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология. 1995. № 6. С.17-26.
- Чесноков С.А., Фродкин В.М., Малькова О.В.* Современные аспекты подземной изоляции высокоактивных отходов и отработанного ядерного топлива // Наука и технологии в промышленности. 2005. № 3. С. 52-61.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
**THE PREDICTION FOR STRESSED-DEFORMED CON-
DITIONS OF THE NIZHNEKANSKY
ROCK MASSIF AS A POSSIBLE ZONE FOR DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTES**

V.N. Morozov¹, I.Yu. Kolesnikov¹, V.N. Tatarinov^{1,2}, T.A. Tatarinova¹

¹The Geophysical Center RAS

²The Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS

The paper provides the results from modeling of stressed-deformed conditions of Nizhnekansky granitoid massif (NKM) (the Yenisey Ridge) being considered as a suitable zone for disposal of high-level radioactive wastes (HLRW). For calculations the authors used a multicomponent structural and tectonic model. Structural blocks with high concentration of stress may pose a real hazard due to the possible tectonic destruction during an environmental hazard of HLRW that may last over 100000 years. Analysis methods for geologic-geophysical data, paleotectonic reconstruction of stress, and tectonophysics modeling provide advanced opportunities for prediction of stability of a geological environment for years. This allows to estimate more precisely the location of possible destruction zones of rock massifs and to choose a zone of a least danger for the HLRW underground disposal.

Keywords: Nizhnekansky rock massif, high-level radioactive waste, prediction of stress-deformed condition.