ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Научная статья
Геотехнология и инженерная геология

Трехмерное моделирование напряженно-деформированного состояния и анализ стабильности породного массива при строительстве подземной исследовательской лаборатории

В.Н.Татаринов[1,2]✉, **В.С.Гупало**[3], **Д.Ж.Акматов**[1,4], **А.И.Маневич**[1,4], **Р.В.Шевчук**[1,2,4], **И.В.Лосев**[1], **А.А.Камаев**[1,4]
[1] *Геофизический центр РАН, Москва, Россия*
[2] *Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия*
[3] *Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия*
[4] *Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*

Как цитировать эту статью: Татаринов В.Н., Гупало В.С., Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Лосев И.В., Камаев А.А. Трехмерное моделирование напряженно-деформированного состояния и анализ стабильности породного массива при строительстве подземной исследовательской лаборатории // Записки Горного института. 2026. Т. 278. С. 3-15. EDN GEFLLF

Аннотация
Представлены результаты моделирования полей напряжений и анализа прочности породного массива на участке Енисейский (Красноярский край), выбранного для строительства подземной исследовательской лаборатории. Обоснованы варианты граничных условий нагружения моделей по ее границам, результаты моделирования распределения компонент тензора напряжений для четырех вариантов нагружения и оценка стабильности массива с использованием известных моделей прочностного анализа Хука – Брауна, Кулона – Мора, Мизеса и др. Определены закономерности распределения полей напряжений в массиве и отличия, связанные с тектоническими условиями района. Установлено, что локализация зон концентрации интенсивности напряжений зависит от соотношения компонент главных действующих напряжений. Ориентация сжатия в субмеридиональном направлении приводит к росту интенсивности напряжений на 10-15 % относительно иных вариантов моделирования. Зоны аномальных значений интенсивности напряжений расположены внутри блоков, а также в лежачих крыльях тектонических разломов. Модели характеризуются высокими значениями потенциальной энергии формоизменения в зонах разломов (как участков массива, наиболее легко поддающихся деформированию) и их пересечений. Трехмерное моделирование позволяет обнаружить эффекты, которые слабо проявляются в моделях плоского деформированного состояния. Результаты геомеханического моделирования необходимы при планировании экспериментов в подземной исследовательской лаборатории для уточнения изоляционных свойств породного массива при захоронении высокоактивных радиоактивных отходов. Методические подходы трехмерного моделирования применяются геомеханическими и геотехническими службами промышленных предприятий и других опасных производственных объектов (подземные хранилища газа, месторождения полезных ископаемых и др.).

Ключевые слова
высокоактивные радиоактивные отходы; подземная исследовательская лаборатория; численное моделирование; породный массив; напряженно-деформированное состояние; критерии прочности

Финансирование
Работа выполнена в рамках Государственного задания ГЦ РАН, утвержденного Минобрнауки России.

Поступила: 24.12.2024 ***Принята: 09.10.2025*** ***Онлайн: 28.01.2026*** ***Опубликована: 12.05.2026***

Введение

Информация о напряженно-деформированном состоянии (НДС) породного массива необходима для решения прикладных геотехнических задач при подземном строительстве и добыче полезных ископаемых [1, 2]. Главная функция геологической среды при эксплуатации подземных хранилищ высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) заключается в обеспечении изоляционных свойств на сверхдлительный период – более 10 тыс. лет [3-5]. В Красноярском крае ведется строительство подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) [6-8]. Породный массив, вмещающий РАО, является объектом геомеханических исследований в ПИЛ, так как именно от его устойчивости

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

зависит геоэкологическая безопасность захоронения РАО [9-11]. Трехмерные геодинамические, геомеханические и геотехнические модели активно применяются на зарубежных ПИЛ – Äspö, Onkalo, Forsmark, Beishan и др. при решении задач, в основном направленных на оценку геодинамической устойчивости пород [12-14].

Напряженно-деформированное состояние геологической среды – это сочетание равномерного всестороннего сжатия (литостатического давления налегающей толщи пород) и девиаторного (избыточного) тектонического напряжения. Равномерное всестороннее сжатие является средним из трех главных напряжений. Оно ответственно за изменение объема среды (дилатансию). Если из главных компонент тензора напряжений вычесть величину равномерного всестороннего сжатия, то оставшиеся величины характеризуют главные девиаторные напряжения, ответственные уже за изменение формы структурных блоков пород. Эти два параметра определяют возможность разрушения горных пород в зонах концентрации максимальных напряжений либо в областях с высокими градиентами изменения их компонент. Такие процессы сопровождаются формированием систем трещин и разуплотнением массива, которые способствуют миграции флюидов и тем самым снижают изоляционные свойства горного массива [15, 16].

Стабильность – это способность геологической среды как многокомпонентной системы функционировать, не изменяя собственную структуру. Наш концептуальный подход основан на парадигме, что геосреда изначально является разломно-блочной. Это прослеживается в фундаментальных работах С.В.Гольдина, М.А.Гончарова, Г.Г.Кочаряна, П.В.Макарова, А.В.Николаева, Д.Н.Осокиной, М.А.Садовского, В.Г.Талицкого, С.И.Шермана и др. Отметим исследования И.М.Батугиной, И.М.Петухова, А.С.Батугина, в которых обоснован подход, основанный на учете НДС и иерархически-блочной структуры геологического массива при оценке устойчивости подземных сооружений в тектонически сложных районах [17, 18].

Структурно-тектонические модели, учитывающие анизотропию упругопрочностных свойств в зонах динамического влияния разломов, по-разному реагирующие на растяжение и сжатие, занимают промежуточное положение между моделями сплошной и дискретной среды [19-21]. При оценке НДС важно учитывать и вертикальную анизотропию полей напряжений [22]. Трехмерные модели позволяют учесть эти важные особенности геологической среды [23-25].

В публикациях авторов [26, 27] представлена трехмерная структурно-тектоническая модель участка и результаты оценки устойчивости горных пород в районе строительства ПИЛ. Настоящая работа является ее продолжением, в ней описаны варианты граничных условий нагружения модели, результаты численного моделирования распределения компонент тензора напряжений и оценка стабильности массива с использованием известных критериев прочностного анализа Хука – Брауна, Кулона – Мора, Мизеса и др. [28-31].

Методы и данные

Геологическое строение участка Енисейский Нижнеканского массива детально описано в работах [4, 32]. На рис.1 представлена трехмерная схема геологического строения участка размерами около 2×1,5×0,5 км. В центральной части показано расположение подземных выработок для размещения РАО.

Для анализа напряженно-деформированного состояния массива использована ранее разработанная структурно-тектоническая модель участка [26], на основе которой построена трехмерная геомеханическая модель в среде Micromine [27]. Участок был дискретизирован на трехмерные ячейки, в каждую из которых занесены данные о свойствах горных пород. Размер ячеек зависел от расстояния до разломов. Разломным зонам назначались упругопрочностные свойства существенно (приблизительно на порядок) слабее, чем в центральных частях структурно-тектонических блоков. Ширина зон динамического влияния разломов задавалась в зависимости от их длины [15].

Далее создавались каркасные модели расчетно-геологических элементов участка, каркасы которых экспортировались в ПО COMSOL Multiphysic 5.6. Затем выбирались тип решаемой краевой задачи и граничные условия, после выполнялся расчет НДС для различных вариантов граничных условий. Полученные данные о распределении напряжений импортировались в среду ГГИС Micromine в виде блочных (ячеистых) моделей и визуализировались в ней для прочностного анализа. Верификация моделей выполнялась путем сопоставления данных модели с реальными наблюдениями, в том числе с данными ГНСС-наблюдений [32]. Для расчетов использовался метод

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.Н.Татаринов, В.С.Гупало, Д.Ж.Акматов, А.И.Маневич, Р.В.Шевчук, И.В.Лосев, А.А.Камаев, 2026

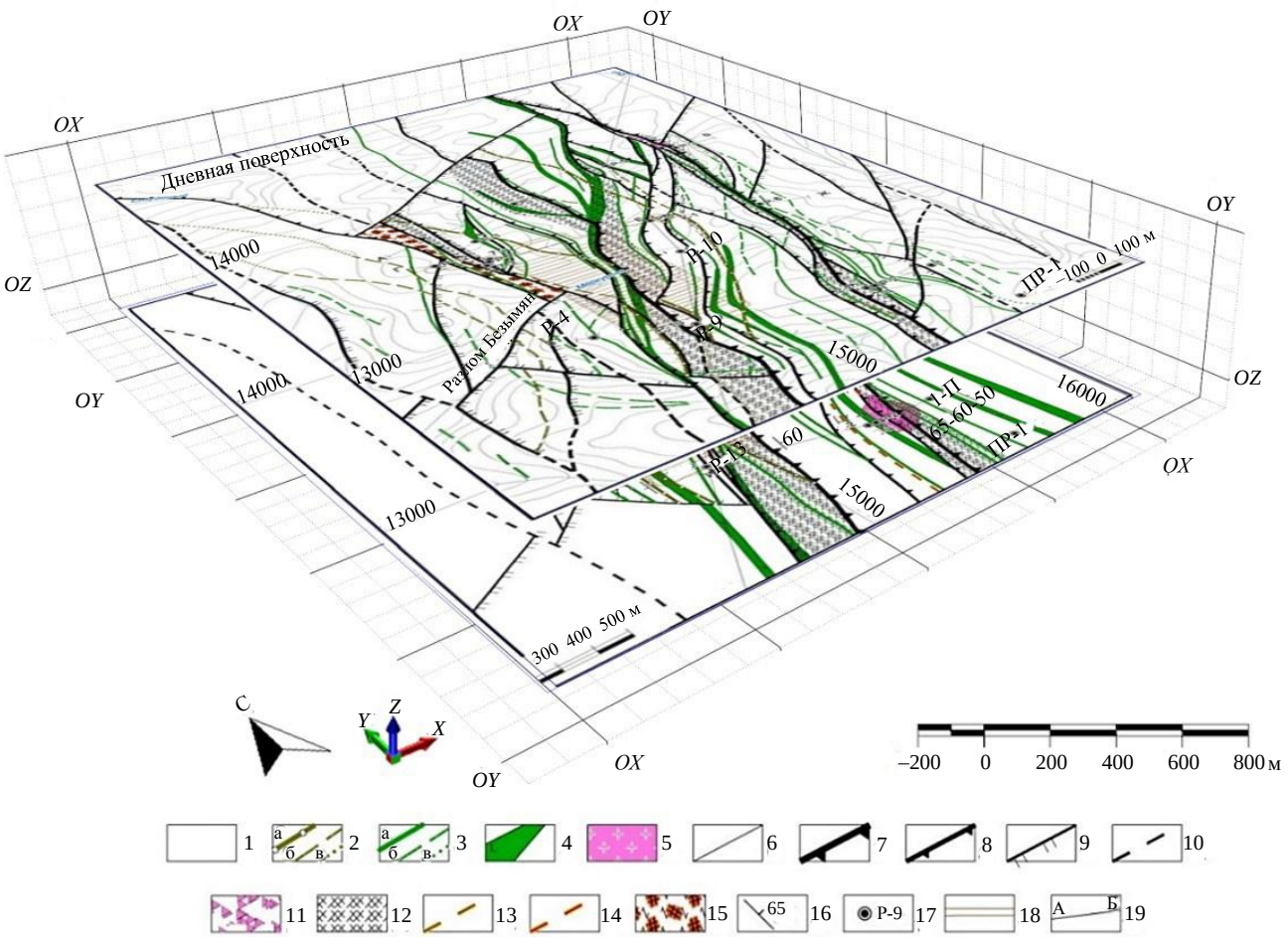


Рис.1. Геологическое строение участка Енисейский [27]

1 – архейские гнейсы; 2-4 – дайки: долериты (2), трахидолериты (3), установленные по данным бурения (а), геофизическим данным (б), предполагаемые (в), метадолериты (4); 5 – гнейсограниты; 6 – геологические границы; 7-10 – разломы: 7, 8 – по данным бурения главные (7), второстепенные (8), 9 – по геофизическим данным, 10 – предполагаемые; 11 – брекчии; 12, 13 – зоны повышенной трещиноватости (12) и внемасштабные (13); 14 – зоны милонитизации; 15 – зоны смятия; 16 – элементы залегания; 17 – буровые скважины; 18 – контур ПГЗРО на горизонтах +5 и –70 м; 19 – линии геологических разрезов

конечных элементов, основанный на вариационном исчислении и механике деформированного твердого тела [33, 34]. Расчетная область разбивается на большое количество малых элементов, внутри которых потенциал изменяется линейно, и решается система линейных алгебраических уравнений с большим количеством узловых перемещений. После чего вычисляются деформации и напряжения из обобщенного закона Гука:

$$\sigma_{ij} = \sum_{kl} c_{ijkl}\varepsilon_{kl}, \tag{1}$$

где σ_{ij}, c_{ijkl}, ε_{kl} – тензоры напряжений, модулей упругости (упругих постоянных, матрица жесткости материала) и деформаций соответственно.

В случае изотропного материала компоненты тензора c_{ijkl} выражаются через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν следующим образом:

$$c_{ijkl} = \lambda\delta_{ij}\delta_{kl} + \mu\left(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}\right), \tag{2}$$

где δ_{ij} – символ Кронекера, $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$, $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$; $\lambda = E\nu/(1+\nu)(1-2\nu)$ – первый коэффициент Ламе; $\mu = E/2(1+\nu)$ – модуль сдвига (второй коэффициент Ламе).

Для численной реализации соотношения (1) используется сокращенная форма тензора c_{ijkl} в виде 6×6 матрицы упругих постоянных (матрицы жесткости):

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

$$[c]=\begin{bmatrix} \lambda+2\mu & \lambda & \lambda & 0 & & \\ \lambda & \lambda+2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda+2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}.$$

Трехмерная структурно-тектоническая модель участка была разбита на 33 расчетно-геологических элемента (РГЭ), относящихся к доменам (тектоническим блокам), и отдельный РГЭ, представляющий набор разломов на участке (рис.2). Каждый РГЭ был охарактеризован усредненными физико-механическими свойствами, включающими объемную плотность ρ, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел прочности на одноосное сжатие σ_c, предел прочности на растяжение σ_p, индекс геологической прочности GSI, а также параметры критерия Кулона – Мора – угол внутреннего трения φ и удельное сцепление *C*. Нарушенные зоны выделялись пониженными значениями GSI от минимальных порядка 35 вблизи ядра разлома, увеличиваясь до 65 по мере удаления от его центра, приближаясь к значениям, характерным для тектонических блоков.

Каркасная модель имеет размеры 7×6×1,5 км, а сама рабочая область, которая рассматривалась при анализе, меньших размеров – 2×1,5×0,5 км. Это было сделано для снижения краевых эффектов, возникающих при расчете НДС на границах модели. Минимальный размер конечного элемента задавался равным 10 м в зонах сочленения разрывных нарушений, горных выработок и других сложных геометрических форм каркасной модели и увеличивался к границам модели.

На рис.3 представлены варианты граничных условий, применяемых при численном моделировании напряженно-деформированного состояния породного массива. В связи с отсутствием

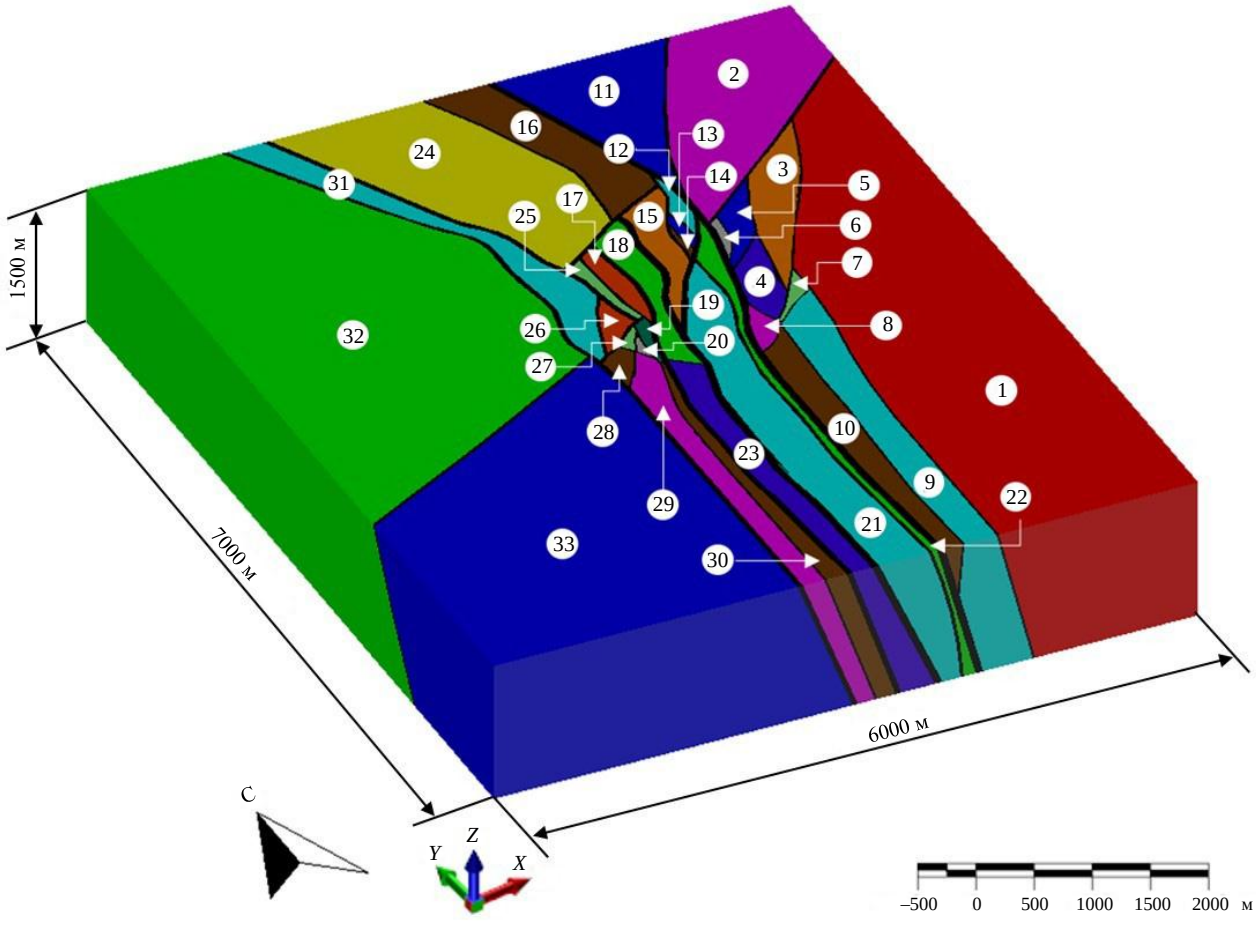


Рис.2. Модель РГЭ участка (порядковые номера элементов модели приведены в кружках)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

надежных инструментальных данных о тектонических напряжениях, в качестве граничных условий приняты четыре варианта. Вдоль боковых границ модели (в направлениях осей *X* и *Y*) приложены горизонтальные тектонические напряжения, величина которых определялась пропорционально вертикальному напряжению, обусловленному гравитационной нагрузкой. Нижняя граница модели закреплена по вертикали, горизонтальные перемещения не ограничены, верхняя поверхность модели является свободной. Граничные усилия вдоль боковых сторон модели варьировались в зависимости от сценариев расчета (рис.3), отражая различные предположения о напряженном состоянии массива – от стандартного литостатического давления до условий тектонического сжатия и анизотропии, заданной по данным ГНСС-наблюдений.

Вертикальные напряжения рассчитывались по классическому выражению для литостатического давления:

$$\sigma_z = \sigma_v = \rho g H = \int_0^H \gamma(z)dz = \gamma H,$$

где σ_v – эффективное вертикальное напряжение; ρ – плотность пород; g – ускорение свободного падения; γ – удельный вес пород; H – глубина залегания; dz – элементарный слой по глубине.

Эффективные горизонтальные напряжения определялись в зависимости от вертикальных напряжений и коэффициента Пуассона, характеризующего упругие свойства пород, в соответствии с принципами линейной теории упругости (коэффициент бокового распора для варианта *а* на рис.3):

$$\sigma_h = \sigma_v \frac{\nu}{1-\nu}. \qquad (3)$$

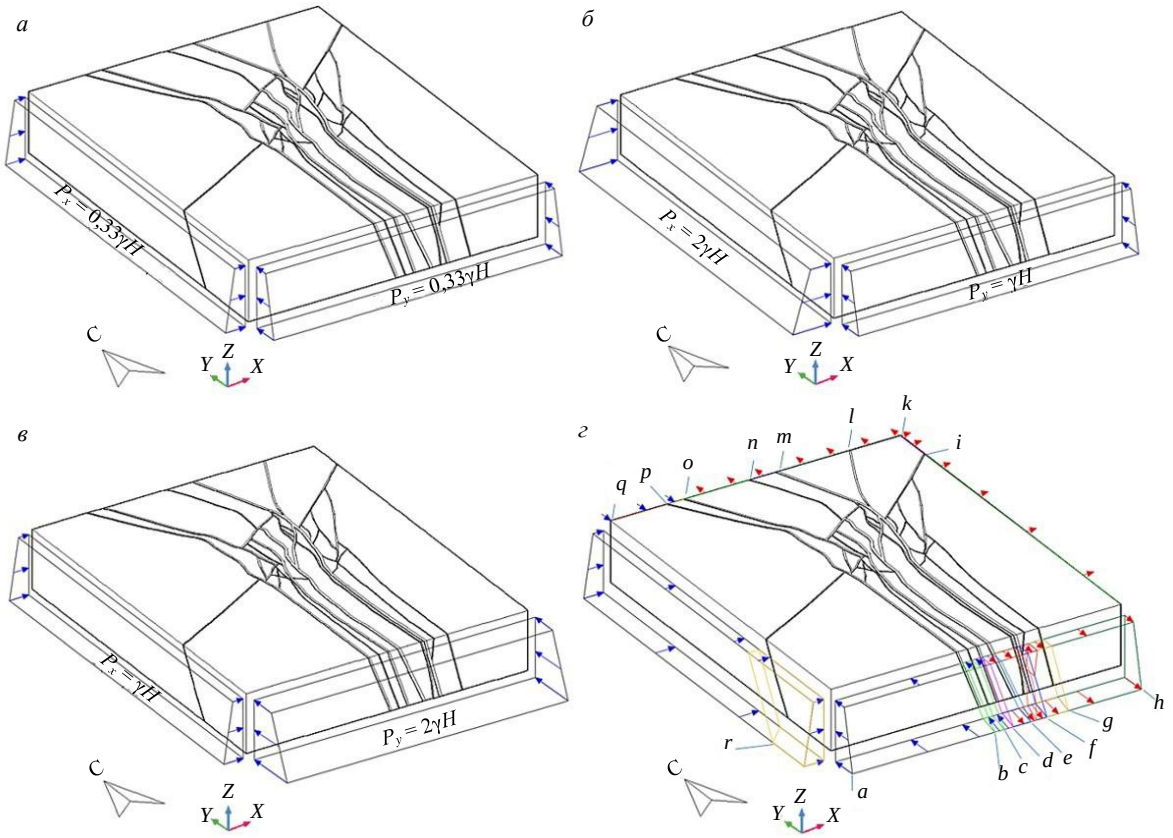


Рис.3. Варианты задания граничных условий (тектонических напряжений) на участке моделирования:
а – на основе гравитационного давления $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 1$; *б* – на основе геологических данных $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0{,}5$;
в – на основе консервативного прогноза $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0{,}5$; *г* – по результатам ГНСС-измерений; кусочно-неоднородное распределение, *a-r* участки контура. Граничные воздействия показаны схематически как поверхностные давления, приложенные к соответствующим граням модели (P_x, P_y вдоль осей *X*, *Y*).
Синие стрелки – сжатие, красные – растяжение

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Результаты расчета полей напряжений

В результате численного моделирования НДС получены модели распределения компонент тензора напряжений для четырех вариантов силового воздействия на модель. Наиболее характерные визуальные модели результатов моделирования представлены на рис.4 и 5.

На рис.4 показано распределение поля вертикальных $\sigma_{zz} = \gamma H$ (литостатических) напряжений на глубине 450 м от земной поверхности для различных вариантов. Видно, что оно вполне адекватно (классически) отражает поле напряжений. Вертикальная компонента закономерно увеличивается от земной поверхности до глубины 450 м от 0 до –13 МПа. В местах расположения разломов образуются зоны разгрузки с σ_{zz} от –5 до –8 МПа, а в центральных частях блоков зоны концентрации напряжений от –15 до –18 МПа для варианта *а* (см. рис.3, 4). И соответственно с изменениями в сторону увеличения для вариантов *б* и *в* (см. рис.3, 4).

На рис.5 представлено распределение интенсивности напряжений σ_i в горизонтальной и вертикальной плоскостях в пределах виртуальных скважин (рис.6, I). Интенсивность напряжений рассчитывается по формуле (2):

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

где σ_x, σ_y, σ_z – нормальные напряжения вдоль осей *X*, *Y*, *Z*; τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{xz} – касательные напряжения в соответствующих плоскостях.

Прочность рассчитывается с помощью эквивалентного напряжения

$$\sigma_{экв} = \sqrt{\frac{\left(\sigma_1 - \sigma_2\right)^2 + \left(\sigma_2 - \sigma_3\right)^2 + \left(\sigma_3 - \sigma_1\right)^2}{2}} \le [\sigma],$$

где σ_1, σ_2, σ_3 – главные напряжения; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение.

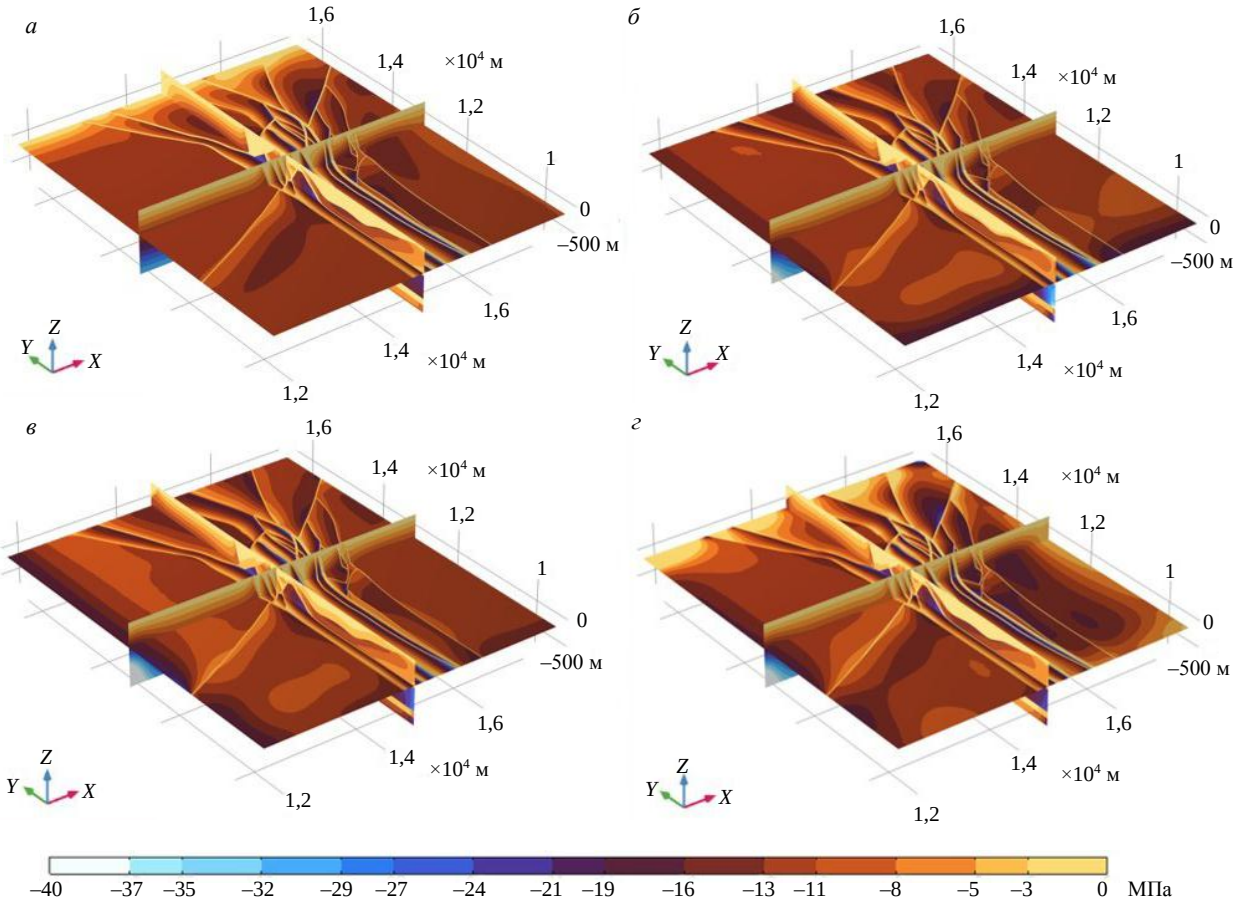


Рис.4. Распределение вертикальных напряжений σ_{zz} для вариантов *а*-*г* граничных условий (см. рис.3)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.Н.Татаринов, В.С.Гупало, Д.Ж.Акматов, А.И.Маневич, Р.В.Шевчук, И.В.Лосев, А.А.Камаев, 2026

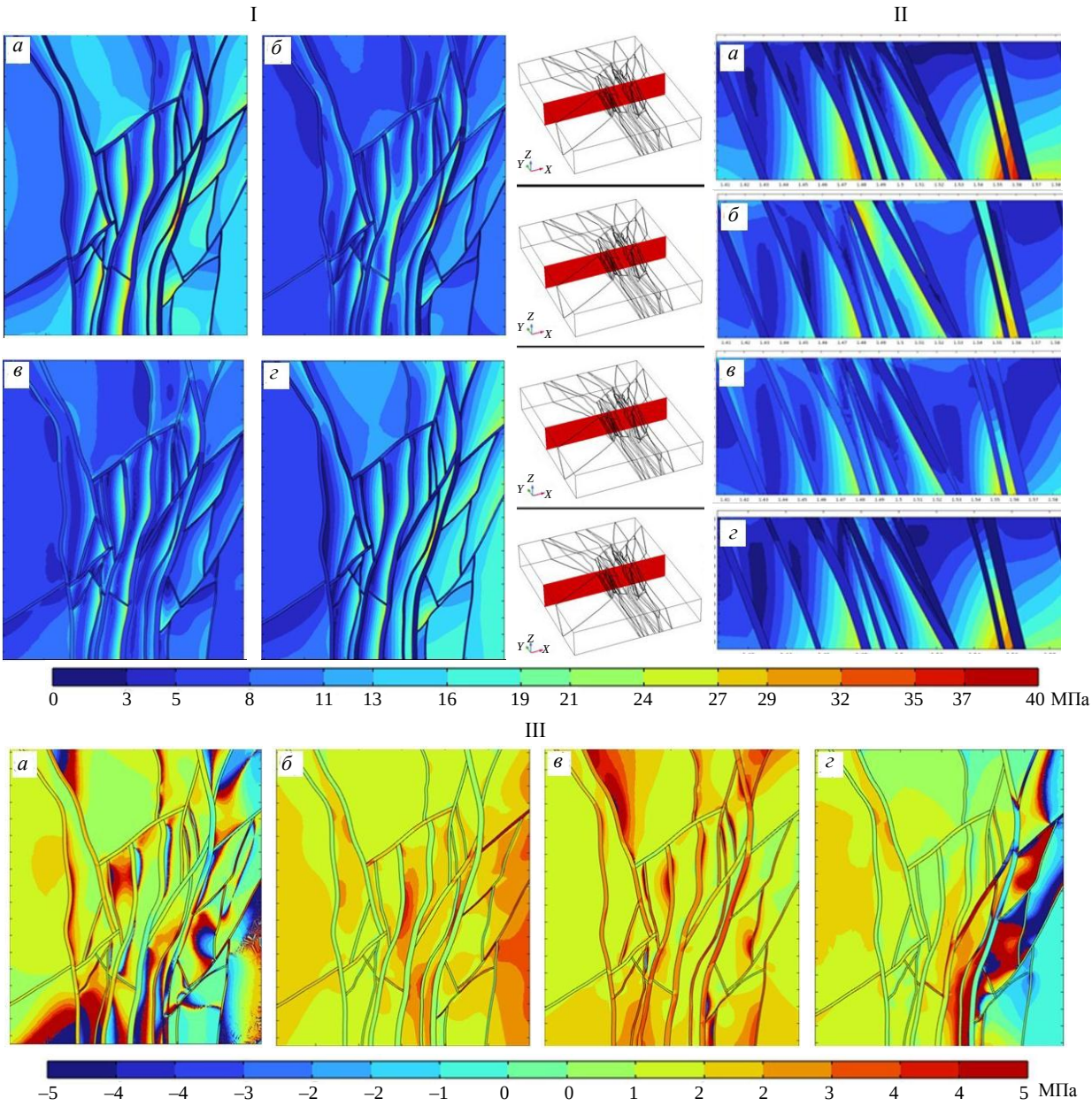


Рис.5. Распределение напряжений на глубине 450 м: интенсивность напряжений σ_i с глубиной в горизонтальных (I) и вертикальных (II) плоскостях и распределение отношения горизонтальных напряжений σ_{yy}/σ_{xx} (III) для вариантов *а-г* (см. рис.3); схематические вставки сверху – положение сечений вертикальных плоскостей (II)

Распределения величины σ_i для вариантов *а* и *г* (см. рис.3, 5) очень близки друг к другу. Значения σ_i варьируются от 0 до 40 МПа, при этом зоны пониженных напряжений 0-8 МПа пространственно приурочены к областям разломов. Максимальные значения интенсивности 35-40 МПа наблюдаются на контактных участках между зонами влияния разломов и тектонических блоков. Напомним, что вариант *г* (см. рис.3) построен по данным фактических наблюдений за деформациями земной поверхности. Можно сделать предварительный важный вывод, что в современных условиях НДС пород на глубине 500 м определяется литостатическим давлением с коэффициентом бокового распора согласно гипотезе Динника (3). Варианты *б* и *в* (см. рис.3, 5), где горизонтальные компоненты завышены в два раза по отношению к γH, отличаются от варианта *г* (рис.5) в сторону завышения.

На рис.5, III показано распределение отношения горизонтальных напряжений σ_{yy}/σ_{xx}. Известно, что чем больше отношение, тем более вероятно разрушение в таком месте. Это хорошо обосновано в работах, посвященных оценке сейсмической опасности [35-37]. Зоны аномальных отношений действующих напряжений $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} >$ 3-5 показывают области массива, где формируются

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

условия образования разрыва с позиции реализации накопленной упругой потенциальной энергии. Вероятное направление формирования разломов определяется направлением наибольшего убывания градиента упругой потенциальной энергии. Варианты *а* и *г* существенно отличаются от вариантов *б* и *в*, особенно в юго-восточной части участка (см. рис.3, 5).

На рис.6 представлены расположение виртуальных скважин в геомеханической модели участка (рис.6, I) и графики распределения интенсивности напряжений σ_i по виртуальной скважине 4 (рис.6, II), которая пересекает зону нарушения и является репрезентативной для анализа. Сопоставление графиков распределения интенсивности напряжений для различных вариантов граничных условий позволяет выявить различия в локализации зон аномальных напряжений, связанных с тектоническими структурами. Для вариантов *а-в* (см. рис.3, 6, II) наблюдается схожее поведение – линейный прирост напряжений за счет литостатического давления с выраженной аномалией пониженных значений σ_i в пределах зоны разлома. Вариант *г*, основанный на данных ГНСС-наблюдений [32], существенно отличается – для него характерны более высокие абсолютные значения напряжений и отмечается аномалия повышенной интенсивности между проектным горизонтом ПИЛ и зоной влияния разлома.

Анализ стабильности породного массива

Существует несколько теорий прочности, характеризующих способность пород сопротивляться механическим нагрузкам. Они обладают как преимуществами, так и недостатками [35, 38, 39]. Для обеспечения комплексной оценки использованы критерии прочности: максимальных касательных напряжений (модель Треска); максимальной удельной потенциальной энергии формоизменения (модель Мизеса); модель Кулона – Мора; модель Хука – Брауна, которая особенно распространена в горной отрасли.

Согласно критерию Хука – Брауна порода будет разрушаться в том случае, если максимальное значение из трех главных напряжений достигнет критического, которое зависит от прочности породы в растяжении и сжатии. Такой критический уровень напряжения определяется выражением

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a,$$

где σ_1, σ_3 – главные максимальные и минимальные напряжения, МПа; σ_{ci} – прочность на одноосное сжатие образца керна, МПа; m_b, s, a – постоянные Хука – Брауна,

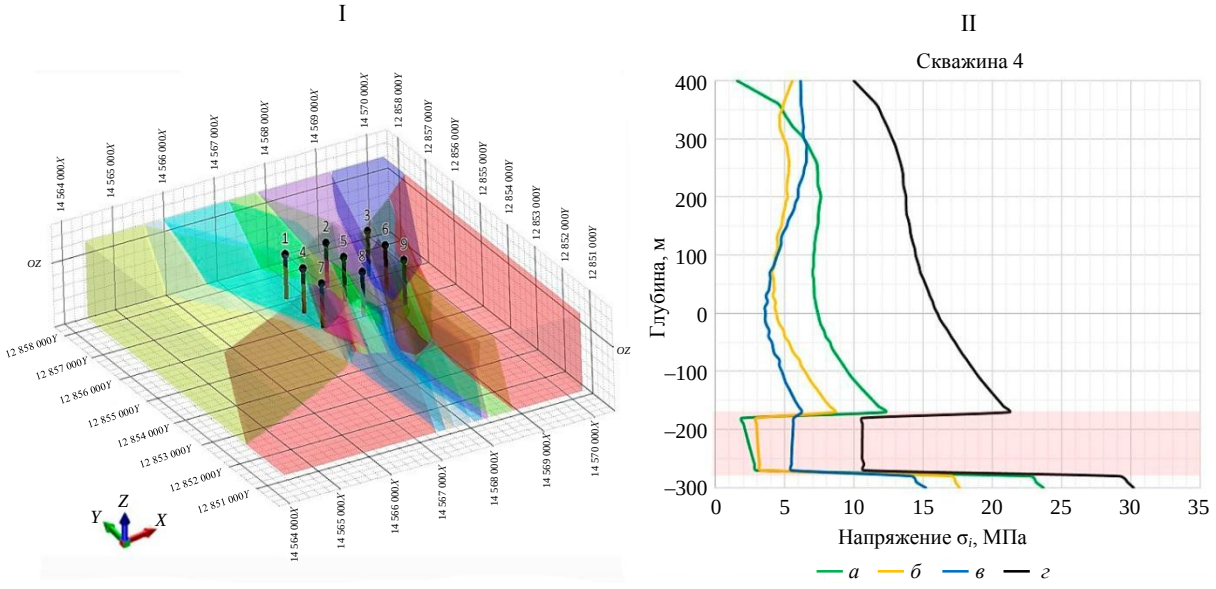


Рис.6. Анализ виртуальных скважин: положение в геомеханической модели участка (I) и распределение интенсивности напряжений σ_i по виртуальной скважине 4 (II) для вариантов *а-г* граничных условий (см. рис.3)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{\mathrm{GSI}-100}{28-14D}\right);$$

$$s = \exp\left(\frac{\mathrm{GSI}-100}{9-3D}\right);$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-\frac{\mathrm{GSI}}{15}} - e^{-\frac{20}{3}}\right);$$

m_i – параметры нарушенной породы; D – коэффициент техногенной нарушенности массива, $0 \le D \le 1$; e – основание натурального логарифма (число Эйлера, приблизительно равно 2,71828). Параметры m_i, GSI, D определяются эмпирически.

Численный расчет индекса GSI выполнялся по эмпирической зависимости с показателем качества породы RQD, рейтингом RMR или Q-индексом в системах Бенявски и Бартона. Параметр D = 0, поскольку на рассматриваемом участке геологического массива горные выработки ПИЛ еще не пройдены. Отсутствие техногенного воздействия на породы позволяет рассматривать структуру массива как формирующуюся исключительно за счет природной трещиноватости.

Интенсивность напряжений является показателем энергонасыщенности фрагмента геологической среды, так как потенциальная энергия формоизменения рассчитывается как

$$U = \frac{1+\overline{\nu}}{3\overline{E}}\sigma_i^2 \Delta V,$$

где V – объем.

Распределение потенциальной энергии формоизменения с точки зрения анализа геомеханических процессов отражает работу, накопленную в теле при его деформации под действием внешних сил или нагрузок. Это энергия, которая аккумулируется в результате изменения формы и структуры массива без разрушения. На рис.7, I представлены результаты расчета потенциальной энергии формоизменения в горизонтальной и вертикальной плоскостях в пределах виртуальных скважин (см. рис.6, I). Общая морфология распределения энергии на качественном уровне повторяется во всех четырех вариантах. По абсолютным значениям U первая модель имеет самые низкие показатели фоновых значений энергии – около 1000 Дж/м^3. Четвертая модель, наоборот, имеет наиболее высокие показатели энергии – до 1300 Дж/м^3. В целом аномально высокие значения U характерны для доменов разломов, приразломных зон и зон сочленения нарушений, что является одним из маркеров верификации модели, так как в разломных зонах должна быть аккумулирована максимальная энергия деформирования [40].

На рис.7, II, III продемонстрировано распределение максимального напряжения сдвига по критериям Хука – Брауна σ_{max} и Кулона – Мора τ_{max} на глубине 450 м, в горизонтальной и вертикальной плоскостях в пределах виртуальных скважин (см. рис.6, I). Представленные модели демонстрируют распределение напряжений с выраженными аномальными зонами, приуроченными к разломам, где напряжения изменяются от –29 до –23 МПа.

Наибольшие изменения напряженного состояния сосредоточены вдоль разломных зон и в их непосредственной окрестности. В межразломных участках (тектонических блоках) распределение напряжений более равномерное с преобладанием умеренных значений максимальных касательных напряжений. Отметим, что в варианте *г* (рис.7) наблюдается выраженная анизотропия напряженного поля, проявляющаяся в формировании зон с резким градиентом напряжений на границах между областями пониженных и повышенных значений. Такой эффект обусловлен неравномерным распределением горизонтальных тектонических усилий, заданных в условиях моделирования. Формирование высоких градиентов напряжений указывает на потенциальные зоны локальных нарушений массива [36, 41, 42].

Обсуждение результатов

Выполненное многовариантное моделирование напряженно-деформированного состояния пород показало наличие как общих закономерностей, так и локальных отличий в распределении полей напряжений. Особенно явно прослеживается взаимосвязь зон концентрации напряжений с глубиной и геометрией разломов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

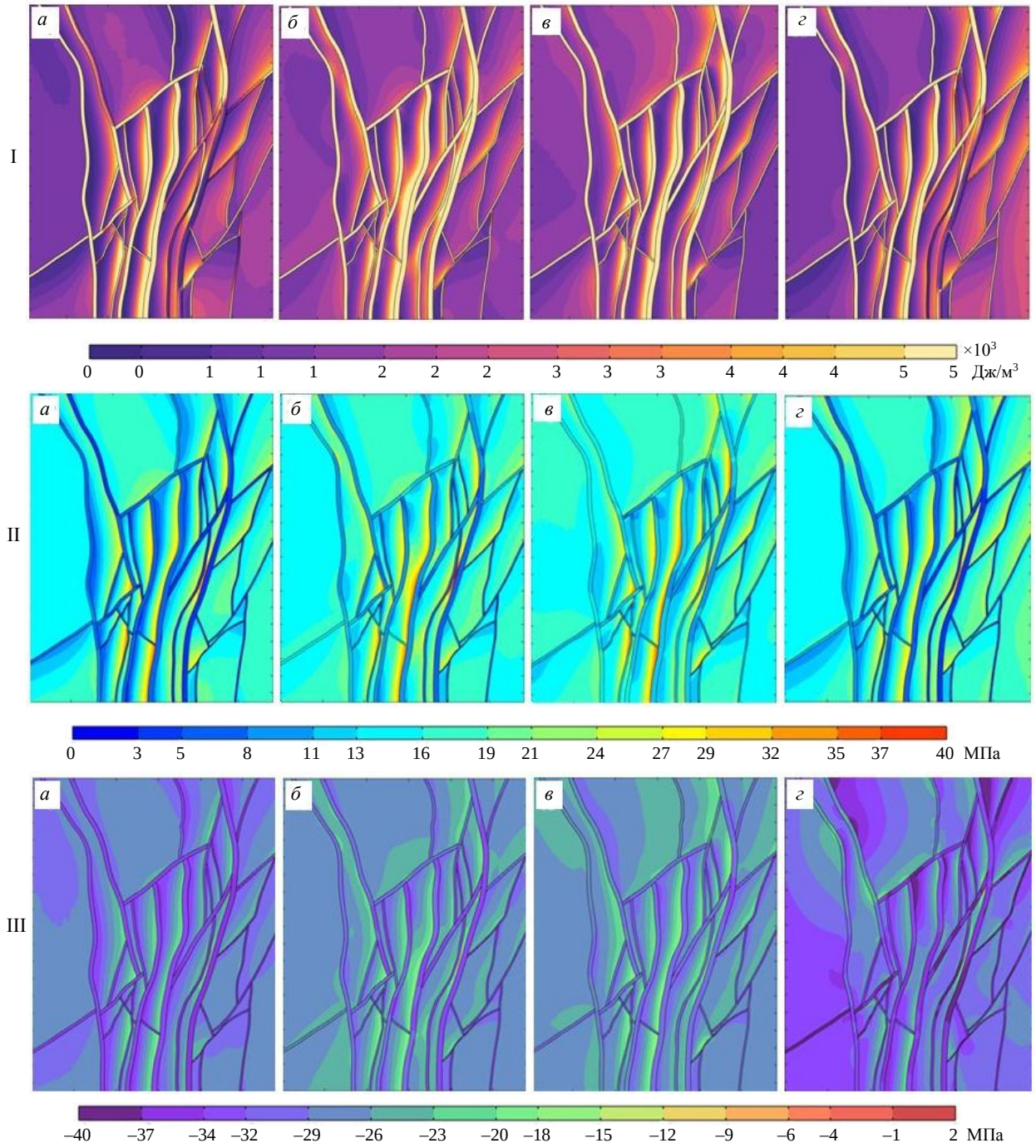


Рис.7. Анализ результатов моделирования на глубине 450 м: распределение потенциальной энергии формоизменения (I), напряжения по критерию Хука – Брауна σ_{max} (II) и Кулона – Мора τ_{max} (III) для вариантов *а-г* (см. рис.3)

Общие тенденции распределения полей напряжений для всех моделей:

• По отношению к разломам эффективные/максимальные значения интенсивности напряжений локализованы внутри структурных блоков и в зависимости от внешних усилий для четырех моделей составляют 12/24, 10/20, 10/20, 9/19 МПа соответственно (см. рис.4), средние значения близки к напряжениям, обусловленным весом пород γH на глубине ~ 500 м. Это вполне закономерное явление, так как нарушенные участки породного массива обладают меньшей несущей способностью и передают усилия на соседние более упругие участки массива.

• Зоны повышенных напряжений локализованы в лежачих крыльях нарушений. Это часто подтверждается данными инструментальными измерениями в горных выработках, глубоких скважинах [37, 39] и при анализе сейсмологических данных [43, 44].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таким образом, обосновывается корректность принятых при моделировании допущений в части задания внешнего поля напряжений и формирования расчетно-геологической модели, адекватной реальной геологической среде.

Отличия распределения полей напряжений:

• На виртуальных скважинах видно, что в местах пересечения разломных зон происходит ступенчатое изменение интенсивности напряжений (см. рис.6, II). Наиболее характерное поведение распределения напряжений наблюдается на кривой четвертой модели (см. рис.6, II, *г*). До глубины 400 м величина напряжений плавно изменяется в диапазоне 5-15 МПа. В пределах зоны разлома (до глубины около 550 м) отмечается снижение напряжений до 3-13 МПа. За пределами разлома происходит резкий рост напряжений до значения около 24 МПа.

• Расположение зон концентрации напряжений зависит от направления (тектонических) усилий и соотношения компонент σ_{yy}/σ_{xx}. Ориентация усилий в субмеридиональном направлении по отношению к субширотному приводит к росту напряжений на 10-15 %.

В рамках граничных условий для оценки стабильности массива были использованы четыре модели прочности со следующими результатами:

• Потенциальная энергия формоизменения в наилучшей степени отражает процесс разрушения массива. В моделях для *U* характерны высокие значения именно в зонах разломов (как участков среды, наиболее легко поддающихся деформированию), притектонических зонах и их сочленениях.

• По критерию Кулона – Мора значения τ_{max} очень близки, при этом значения максимального напряжения сдвига достигают 35 МПа.

• Распределение по критерию Хука – Брауна σ_{max} почти соответствует предыдущим вариантам, но максимальное главное напряжение несколько ниже 25 МПа.

• На схемах распределения максимальных касательных напряжений по критерию Треска τ_{max}, который ориентирован на хрупкие породы, получены более контрастные картины. Фоновые значения величины τ_{max} отмечаются в диапазоне от 4 до 16 МПа. Для четвертой модели в восточной части получены более высокие значения.

Заключение

Проведенное 3D-моделирование НДС пород позволило получить распределение полей напряжений в породном массиве до глубины 500 м на участке Енисейский. Выполнена оценка соотношения полученных в моделях компонент тензора напряжений и прочностных свойств пород по четырем наиболее известным моделям прочности. Анализ результатов для четырех вариантов граничных условий, задаваемых по границам участка, показал, что породный массив достаточно стабилен и обладает необходимым запасом прочности.

Анализ трехмерных моделей НДС показал, что они обладают рядом преимуществ перед моделями в 2D-постановке. Главный эффект заключается в том, что 3D-моделирование позволяет обнаружить пространственные эффекты, которые слабо проявляются в моделях плоского деформированного состояния, в частности за счет отсутствия учета углов падения разломов. Это особенно важно для нарушений с углами падения менее 60°. Результаты будут использованы при планировании геомеханических экспериментов в подземной исследовательской лаборатории для уточнения изоляционных свойств породного массива.

Повышение качества проектирования строительства подземных сооружений и отработки месторождений полезных ископаемых строится на активном использовании цифровых геолого-технологических моделей (цифровых двойников) [45]. Создание 3D-моделей НДС пород способствует анализу информации и принятию обоснованных инженерных решений. Внедрение 3D-моделей позволяет существенно повысить эффективность работы с базами геолого-геофизических данных, достоверность прогнозных расчетов и безопасность ведения горных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Протосеня А.Г., Беляков Н.А., Буслова М.А.* Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 619-627.

2. *Еременко В.А.* Моделирование напряженно-деформированного состояния горнотехнической системы рудника при соосной отработке трех этажей камерной системой разработки (в программном комплексе Map3D) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11. С. 5-17. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-5-17

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

3. *Абалкина И.Л., Большов Л.А., Капырин И.В. и др.* Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние. Препринт № IBRAE-2019-03. М.: ИБРАЭ РАН, 2019. 40 с.

4. *Андерсон Е.Б., Белов С.В., Камнев Е.Н. и др.* Подземная изоляция радиоактивных отходов. М.: Горная книга, 2011. 592 с.

5. *Кочкин Б.Т., Мальковский В.И., Юдинцев С.В.* Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). М.: Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 2017. 384 с.

6. *Абрамов А.А., Большов Л.А., Дорофеев А.Н. и др.* Подземная исследовательская лаборатория в Нижнеканском массиве: эволюционная проработка облика // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 9-21. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-9-21

7. *Гупало В.С., Казаков К.С., Минаев В.А. и др.* Результаты исследований в существующих скважинах на участке недр «Енисейский», в том числе для определения основных систем трещин и анизотропии массива пород // Радиоактивные отходы. 2021. № 1 (14). С. 76-86. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-76-86

8. *Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И. и др.* Подземная исследовательская лаборатория: задачи геодинамических исследований // Радиоактивные отходы. 2019. № 1 (6). С. 77-89.

9. *Цебаковская Н.С., Уткин С.С., Капырин И.В. и др.* Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. М.: Комтехпринт, 2015. 208 с.

10. *Rutqvist J., Tsang C.-F.* Modeling nuclear waste disposal in crystalline rocks at the Forsmark and Olkiluoto repository sites – Evaluation of potential thermal-mechanical damage to repository excavations // Tunnelling and Underground Space Technology. 2024. Vol. 152. № 105924. DOI: 10.1016/j.tust.2024.105924

11. *Chenxi Zhao, Qinghua Lei, Martin Ziegler, Simon Loew.* Structurally-controlled failure and damage around an opening in faulted Opalinus Clay shale at the Mont Terri Rock Laboratory: In-situ experimental observation and 3D numerical simulation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2024. Vol. 180. № 105812. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2024.105812

12. *Hongsu Ma, Ju Wang, Ke Man et al.* Excavation of underground research laboratory ramp in granite using tunnel boring machine: Feasibility study // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2020. Vol. 12. Iss. 6. P. 1201-1213. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.09.002

13. *Yue Zhang, Qiang-Yong Zhang, Kang Duan et al.* Reliability analysis of deep underground research laboratory in Beishan for geological disposal of high-level radioactive waste // Computers and Geotechnics. 2020. Vol. 118. № 103328. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103328

14. *Zhiguo An, Qingyun Di, Changmin Fu, Zhongxing Wang.* CSAMT-Driven Feasibility Assessment of Beishan Underground Research Laboratory // Sensors. 2025. Vol. 25. Iss. 14. № 4282. DOI: 10.3390/s25144282

15. *Кочарян Г.Г.* Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса // Физика Земли. 2021. № 4. С. 3-41. DOI: 10.31857/S0002333721040062

16. *Fraser Harris A.P., McDermott C.I., Kolditz O., Haszeldine R.S.* Modelling groundwater flow changes due to thermal effects of radioactive waste disposal at a hypothetical repository site near Sellafield, UK // Environmental Earth Sciences. 2015. Vol. 74. Iss. 2. P. 1589-1602. DOI: 10.1007/s12665-015-4156-6

17. *Петухов И.М., Батугина И.М.* Геодинамика недр. М.: Недра коммюникейшенс ЛТД, 1999. 287 с.

18. *Батугин А.С., Огаджанов В.А., Хан С.А. и др.* Exploring the Nature of Seismic Events in the Underground Gas Storages Area of the Volga Federal District // Russian Journal of Earth Sciences. 2022. Vol. 22. № 6. № ES6010 (in English). DOI: 10.2205/2022ES000819

19. *Зуев Б.Ю.* Методология моделирования нелинейных геомеханических процессов в блочных и слоистых горных массивах на моделях из эквивалентных материалов // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 542-552. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.7

20. *Danda Shi, Jinzhong Niu, Jiao Zhang et al.* Effects of particle breakage on the mechanical characteristics of geogrid-reinforced granular soils under triaxial shear: A DEM investigation // Geomechanics for Energy and the Environment. 2023. Vol. 34. № 100446. DOI: 10.1016/j.gete.2023.100446

21. *Torabi A., Rudnicki J., Alaei B., Buscarnera G.* Envisioning faults beyond the framework of fracture mechanics // Earth-Science Reviews. 2023. Vol. 238. № 104358. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104358

22. *Qiangyong Zhang, Chuancheng Liu, Kang Duan et al.* True Three-Dimensional Geomechanical Model Tests for Stability Analysis of Surrounding Rock During the Excavation of a Deep Underground Laboratory // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. Vol. 53. Iss. 2. P. 517-537. DOI: 10.1007/s00603-019-01927-0

23. *Ziegler M.O., Heidbach O.* The 3D stress state from geomechanical–numerical modelling and its uncertainties: a case study in the Bavarian Molasse Basin // Geothermal Energy. 2020. Vol. 8. № 11. DOI: 10.1186/s40517-020-00162-z

24. *Ziegler M.O., Heidbach O.* Increasing accuracy of 3-D geomechanical-numerical models // Geophysical Journal International. 2024. Vol. 237. Iss. 2. P. 1093-1108. DOI: 10.1093/gji/ggae096

25. *Ahlers S., Henk A., Hergert T. et al.* 3D crustal stress state of Germany according to a data-calibrated geomechanical model // Solid Earth. 2021. Vol. 12. Iss. 8. P. 1777-1799. DOI: 10.5194/se-12-1777-2021

26. *Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Татаринов В.Н. и др.* Оценка устойчивости породного массива в районе подземной исследовательской лаборатории (Нижнеканский массив, участок Енисейский) // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 167-178.

27. *Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В.* Трехмерная структурно-тектоническая модель Енисейского участка (Нижнеканский массив) // Горный журнал. 2023. № 1. С. 69-74. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.11

28. *Hoek E., Brown E.T.* The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 445-463. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.001

29. *Reches Z., Wetzler N.* An energy-based theory of rock faulting // Earth and Planetary Science Letters. 2022. Vol. 597. № 117818. DOI: 10.1016/j.epsl.2022.117818

30. *Коршунов В.А., Павлович А.А., Бажуков А.А.* Оценка сдвиговой прочности горных пород по трещинам на основе результатов испытаний образцов сферическими инденторами // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 606-618. DOI: 10.31897/PMI.2023.16

31. *Морозов О.А., Расторгуев А.В., Неуважаев Г.Д.* Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 46-62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

32. *Гвишиани А.Д., Татаринов В.Н., Кафтан В.И. и др.* Скорости современных горизонтальных движений земной коры в южной части Енисейского кряжа по результатам ГНСС-измерений // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 1. С. 73-77. DOI: 10.31857/S2686739720070075

33. *Kruszewski M., Hofmann H., Alvarez F.G. et al.* Integrated Stress Field Estimation and Implications for Enhanced Geothermal System Development in Acoculco, Mexico // Geothermics. 2021. Vol. 89. № 101931. DOI: 10.1016/j.geothermics.2020.101931

34. *Kruszewski M., Montegrossi G., Balcewicz M. et al.* 3D in situ stress state modelling and fault reactivation risk exemplified in the Ruhr region (Germany) // Geomechanics for Energy and the Environment. 2022. Vol. 32. № 100386. DOI: 10.1016/j.gete.2022.100386

35. *Baron I., Melichar R., Sokol L. et al.* 3D active fault kinematic behaviour reveals rapidly alternating near-surface stress states in the Eastern Alps // Geological Society, London, Special Publications. 2024. Vol. 546. P. 119-133. DOI: 10.1144/SP546-2023-32

36. *Bramham E.K., Wright T.J., Paton D.A., Hodgson D.M.* A new model for the growth of normal faults developed above pre-existing structures // Geology. 2021. Vol. 49. № 5. P. 587-591. DOI: 10.1130/G48290.1

37. *Грищенко А.И., Семенов А.С., Мельников Б.Е.* Моделирование процессов деформирования и разрушения керна при его извлечении с больших глубин // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С. 243-252. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.8

38. *Ahlers S., Röckel L., Hergert T. et al.* The crustal stress field of Germany: a refined prediction // Geothermal Energy. 2022. Vol. 10. № 10. DOI: 10.1186/s40517-022-00222-6

39. *Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А.* Напряженное состояние земной коры Алтае-Саянской горной области: реконструкция на основе модифицированных алгоритмов катакластического метода // Геосистемы переходных зон. 2024. Т. 8. № 4. С. 261-276. DOI: 10.30730/gtrz.2024.8.4.261-276

40. *Junjie Xiao, Jiacun Liu, Ying Xu et al.* An improved three-dimensional extension of Hoek–Brown criterion for rocks // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2024. Vol. 10. Iss. 1. № 129. DOI: 10.1007/s40948-024-00841-2

41. *Будков А.М., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г.* Моделирование сверхсдвигового режима распространения разрыва по разлому с гетерогенной поверхностью // Физика Земли. 2022. № 4. С. 135-150. DOI: 10.31857/S0002333722040019

42. *Будков А.М., Кочарян Г.Г.* Формирование зоны нарушенного материала в окрестности динамического сдвига по разлому в кристаллическом массиве горных пород // Физическая мезомеханика. 2024. Т. 27. № 1. С. 102-116. DOI: 10.55652/1683-805X_2024_27_1_102-116

43. *Qiang Xu, Qiangling Yao, Changhao Shan, Chuangkai Zheng.* A New Hydraulic Fracturing Instrument to Measure In Situ Stress and Its Application in Chahasu Coal Mine // Geotechnical Testing Journal. 2022. Vol. 45. Iss. 5. P. 901-914. DOI: 10.1520/GTJ20210207

44. *Heidbach O., Rajabi M., Xiaofeng Cui et al.* The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales // Tectonophysics. 2018. Vol. 744. P. 484-498. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.07.007

45. *Бирючев И.В., Макаров А.Б., Усов А.А.* Геомеханическая модель рудника. Ч. 1. Создание // Горный журнал. 2020. № 1. С. 42-48. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.08

***Авторы*: Виктор Николаевич Татаринов,** *д-р техн. наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией* (*Геофизический центр РАН, Москва, Россия*), *ведущий научный сотрудник* (*Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия*), victat@wdcb.ru, https://orcid.org/0000-0001-7546-2072, **Владимир Сергеевич Гупало,** *д-р техн. наук, заведующий лабораторией* (*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия*), https://orcid.org/0000-0002-2228-1275, **Дастан Женишбекович Акматов,** *канд. техн. наук, старший научный сотрудник* (*Геофизический центр РАН, Москва, Россия*), *старший преподаватель* (*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*), https://orcid.org/0000-0001-6435-464X, **Александр Ильич Маневич,** *научный сотрудник* (*Геофизический центр РАН, Москва, Россия*), *старший преподаватель* (*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*), https://orcid.org/0000-0001-7486-6104, **Роман Васильевич Шевчук,** *канд. техн. наук, старший научный сотрудник* (*Геофизический центр РАН, Москва, Россия*), *научный сотрудник* (*Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия*), *старший преподаватель* (*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*), https://orcid.org/0000-0003-3461-6383, **Илья Владимирович Лосев,** *канд. техн. наук, старший научный сотрудник* (*Геофизический центр РАН, Москва, Россия*), https://orcid.org/0009-0005-0785-4986, **Артем Анатольевич Камаев,** *младший научный сотрудник* (*Геофизический центр РАН, Москва, Россия*), *аспирант* (*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*), https://orcid.org/0009-0008-5139-8086.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0