УДК 539.3+519.6

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПРИРОДНЫХ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПРЯМЫХ И КОСВЕННЫХ ДАННЫХ О ПОЛЯХ НАПРЯЖЕНИЙ

© 2024 г. Л. А. Назарова*, Л. А. Назаров, А. В. Панов, А. А. Скулкин

ФГБУН Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия

**E-mail: larisa.a.nazarova@mail.ru*

Обоснование технологий вскрытия и отработки месторождений твердых полезных ископаемых, сейсмическое районирование территорий в интересах крупномасштабного строительства проводятся с использованием геомеханических моделей, поэтому валидация последних является актуальной задачей. В статье рассмотрены некоторые аспекты построения геомеханических моделей, связанные с выбором размеров и ориентации расчетной области, а также количественной оценкой компонент поля напряжений вне зоны влияния целевого объекта. На основе сравнительного анализа линейных размеров тектонических блоков первого и второго масштабных уровней Алтае-Саянской складчатой области найдено значение коэффициента иерархичности по М. А. Садовскому k = 3.17–3.22, который предлагается использовать при построении вложенных геомеханических моделей для региона основных железорудных месторождений Горной Шории. Разработан и на реальных геотехнических объектах различного масштабного уровня (Соликамский рудник и угольный пласт на выемочном участке шахты «Воркутинская») апробирован метод количественной оценки параметров внешнего поля напряжений. Метод основан на решении обратных граничных задач по прямым (измерительный гидроразрыв) и косвенным (пассивная сейсмическая томография с использованием координат гипоцентров динамических событий и времен первых вступлений, зарегистрированных шахтными сейсмостанциями) данным. Реализация этого метода позволила определить величины и ориентацию главных горизонтальных напряжений вне зоны влияния Соликамского рудника 14 и 24 МПа, свидетельствующие о взбросовом геодинамическом режиме в окрестности этого геотехнического объекта.

Ключевые слова: геомеханическая модель, иерархия блочных структур, напряжения, коэффициент бокового распора, обратная задача, измерительный гидроразрыв, сейсмическая томография.

Для цитирования: *Назарова Л.А., Назаров Л.А., Панов А.В., Скулкин А.А.* Особенности построения геомеханических моделей крупномасштабных природных и геотехнических объектов на основе прямых и косвенных данных о полях напряжений // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 3. С. 92–101. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_3_92

Введение

Сейсмическое районирование территорий для крупномасштабного строительства, проектирование новых шахт и рудников, обоснование технологий отработки месторождений полезных ископаемых, исследование современных движений верхней части земной коры для средне- и долгосрочного прогноза землетрясений – вот далеко неполный перечень проблем, при решении которых используются геомеханические модели (ГМ) целевого объекта. Основными элементами последних являются [Булычев, 1994]: структура (устанавливается по геологическим, геофизическим и геодезическим данным); физические свойства горных пород (определяются, в основном, по данным сейсморазведки, результатам лабораторных испытаний образцов и натурным измерениям); естественное поле напряжений вне зоны влияния исследуемого объекта. Процедуры задания структуры и свойств последнего хорошо известны [Hudson, 1993; Jaeger et al., 2007]. Для оценки параметров естественного поля напряжений, зачастую определяющих краевые условия в ГМ и пространственную ориентацию области расчета, предложен целый ряд подходов:

1) предположения о величине коэффициента бокового распора q [Иофис и др., 1989; Каспарьян и др., 2019]: q = 1 – гипотеза о гравитационном поле внешних напряжений [Heim, 1878], $q = \nu/(1-\nu)$ – гипотеза Динника [Динник, 1925], постулирующая отсутствие горизонтальных деформаций, ν – коэффициент Пуассона), порой, без серьезных предпосылок [Попов и др., 2005; Тупысев, 2022];

2) ретроспективный анализ сейсмотектонических и геологических данных [Кочарян, 2016; Zang, Stephansson, 2010; Li et al., 2023];

3) инструментальное измерение напряжений *in situ* [Jaeger et al., 2007; Каспарьян и др., 2019; Борщ-Компониец, 2013];

4) использование косвенной (геодезической, геофизической) информации [Nazarova, 1999; Nazarov, Nazarova, 2004; Nazarova et al., 2017];

5) физическое моделирование с использованием горных пород и геоматериалов [Morozov et al., 2019].

Второй и третий подходы реализуются в рамках ГМ посредством формулировки обратной граничной задачи с подходящей целевой функцией одного из двух типов

$$\Psi_1(\vec{p}) = \sum_m \sum_n \left[s_m(x_n, y_n, z_n, \vec{p}) - s_m^*(x_n, y_n, z_n) \right]^2 \quad (1)$$

$$\Psi_2(\vec{p}) = \sum_l \alpha_l \sum_m \sum_n \left[1 - s_{lm}(x_n, y_n, z_n, \vec{p}) / s_{lm}^*(x_n, y_n, z_n) \right]^2 \quad (2)$$

где $\vec{p}$ – вектор подлежащих определению параметров ГМ, s_m^* и s_{lm}^* – данные инструментальных измерений, содержащие прямую или косвенную информацию о напряженно-деформированном состоянии породного массива в точках (x_n, y_n, z_n), $s_m(x_n, y_n, z_n, \vec{p})$ и $s_{lm}(x_n, y_n, z_n, \vec{p})$ – соответствующие этим данным величины, рассчитанные по ГМ при некоторых значениях $\vec{p}$, α_l – «весовые» коэффициенты ($\Sigma\alpha_l = 1$), позволяющие учесть качество входных данных и, порой, обеспечить унимодальность целевой функции и разрешимость обратной задачи. Если входные данные имеют одинаковую размерность, то целесообразно использовать функцию ψ_1, если разную, то ψ_2. Рассмотрим примеры такого подхода для геотехнических объектов различного масштабного уровня.

Оценка размеров расчетной области в иерархии геомеханических моделей

При разработке и численной реализации ГМ важным аспектом является выбор размеров расчетной области G, а также ее положения относительно целевого объекта и доминирующих разломных структур. Здесь имеет место своеобразная дилемма: увеличение G диктуется необходимостью задать граничные условия вне зоны влияния объекта, что неизбежно приводит к уменьшению детализации описания структуры и степенному возрастанию времени вычислений. Дополнительные сложности возникают при наличии разломных структур, контролирующих геодинамический режим вмещающего объект массива. Одним из способов преодоления этих трудностей является построение нескольких «вложенных» ГМ, когда граничные условия на следующем иерархическом уровне задаются с учетом поля напряжений на предшествующем уровне [Дядьков и др., 2009; Назарова, 2021]. Оценка коэффициента иерархичности k, которая «осталась за кадром» в [Назарова, 2021], осуществлялась в соответствии с концепцией М. А. Садовского [Садовский и др., 1987; Садовский, 2004] и заключалась в анализе размеров блоков двух соседних иерархических уровней, в которых расположены основные месторождения твердых полезных ископаемых Кузнецкого Алатау, Салаира и Горной Шории.

Существует достаточно много тектонических карт, например, [Тектоника Сибири, 1962; Геологическая карта, 1982; Геологическая карта СССР (новая серия), 1982] с различающимися данными для разломов первого уровня. Здесь анализ проводился на основе [Геологическая карта СССР, 1982], с уточнениями по [Жалковский и др., 1995; Лобацкая, Краснораменская, 2008].

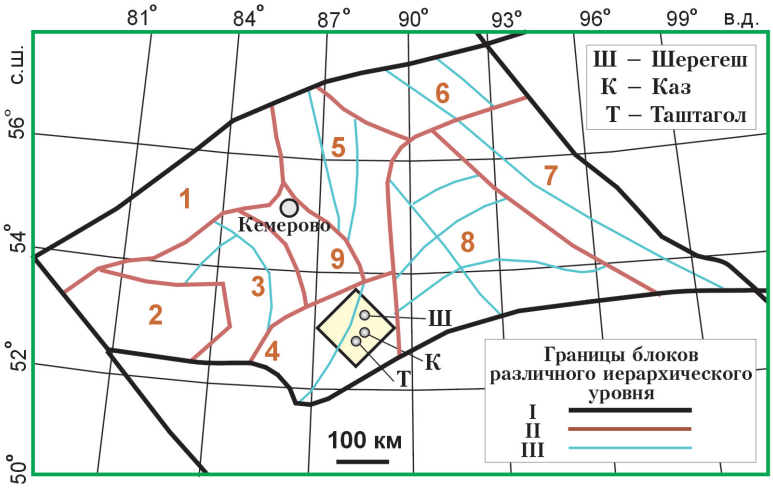

Рис. 1. Блоковое строение части Алтае-Саянской складчатой области по [Геологическая карта СССР (новая серия), 1982], вмещающей основные месторождения твердых полезных ископаемых

На рис. 1 показана тектоническая структура области, содержащей целевой объект: блок первого иерархического уровня (площадь S = 474 тыс км^2, максимальный линейный размер L = 1400 км), разбитый разломами второго уровня на блоки, пронумерованные от 1 до 9.

Таблица 1.

Размеры и площади блоков второго иерархического уровня

№№ блоков	L_i, км	S_i, тыс км^2	$\sqrt{S_i}$, км
1	550	60	245
2	340	37	192
3	400	45	212
4	330	40	200
5	410	55	234
6	400	32	179
7	620	75	274
8	570	100	316
9	310	20	141

В табл. 1 приведены основные геометрические параметры блоков второго масштабного уровня, средний линейный размер последних $\overline{L_i} = 433$ км, тогда коэффициент иерархичности М. А. Садовского

$$k_L = L / \overline{L_i} = 3.29,$$

что хорошо коррелирует с оценками [Садовский, 2004], согласно которым $k \cong 3 - 3.5$. Аналогичный анализ для величин $\sqrt{S_i}$ дает $\overline{\sqrt{S_i}} = 217$ км и $k_S = \sqrt{S} / \overline{\sqrt{S_i}} = 3.17$.

Этот результат не является очевидным, т.к. при произвольном разбиении некоторой области на подобласти $1 < k_L, k_S < \infty$.

Таким образом, при разработке ГМ окрестности основных месторождений твердых полезных ископаемых Кузнецкого Алатау, Салаира и Горной Шории для оценки региональных напряжений при реализации предложенных подходов размеры вложенных расчетных областей следует выбирать в соответствии с рекомендацией: первая область расположена полностью внутри блока 4 второго масштабного уровня (желтый квадрат на рис. 1, линейные размеры в плане 120 км × 120 км), вторая область размерами примерно 400 км × 400 км будет охватывать все соседние блоки второго уровня, а третья область – полностью вмещать блок первого иерархического уровня. Эта рекомендация и использовалась при построении вложенных ГМ в [Назарова, 2021].

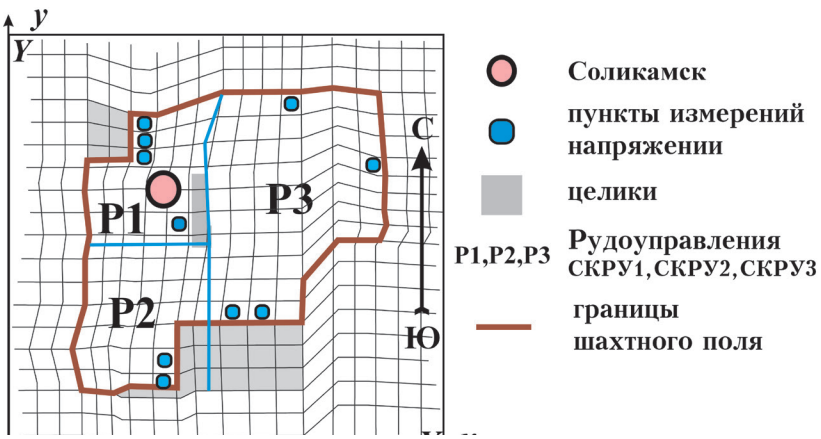

Рис. 2. Схема Соликамского рудника, шахтное поле, фрагмент сетки конечных элементов и расположение пунктов измерения напряжений

Оценка компонент поля напряжений вне зоны влияния горных работ по данным измерительного гидроразрыва

Реализуем предложенный подход к оценке компонент внешнего поля напряжений в окрестности целевого объекта – Соликамского рудника (Пермский край, Россия). Рудник расположен на глубине около 350 м, мощность соляной толщи до 500 м, средняя плотность пород $\rho = 2000$ кг/м^3, вертикальное напряжение на верхней границе залежи $\sigma_V = 7$ МПа. Для исследования локализации зон концентрации напряжений и оценки напряженно-деформированного состояния в окрестности геомеханического пространства объекта в десяти пунктах (рис. 2) шахтного поля методом измерительного гидроразрыва были проведены $N = 119$ экспериментов, в результате которых установлены минимальная $s_1^*(x_n, y_n, z_n)$ и максимальная $s_2^*(x_n, y_n, z_n)$ компоненты тензора напряжений в каждой точке измерения. Небольшой фрагмент полученных данных приведен в табл. 2.

Таблица 2.

Выборочные данные измерительного гидроразрыва

№ пункта	φ, град	*r*, м	s_1^*, МПа	s_2^*, МПа	μ_σ
7	30	8.5	10.2	16.4	-0.29
7	30	8.0	12.4	19.0	-0.08
8	0	9.0	10.0	18.8	-0.46
8	30	10.0	10.2	17.1	-0.34
8	60	7.0	10.7	16.4	-0.19

Примечание: φ– азимут измерительной скважины, *r* – расстояние от контура выработки до места гидроразрыва, μ_σ – коэффициент Лоде-Надаи

Для интерпретации результатов *in situ* замеров разработана и численно реализована упругая геомеханическая модель рудника: на рис. 2 представлена схема расчетной области (центральный фрагмент), $X = 100$ км, $Y = 88$ км; размеры шахтного поля 20 км × 18 км, сетка конечных элементов (разрежена в пять раз), учитывающая конфигурацию выработанного пространства, а также физические свойства соли и вмещающих пород (табл. 3).

Таблица 3.

Физические свойства пород в ГМ

Порода	*E*, ГПа	ν	ρ, кг/м^3
Сильвинит	5.10	0.3	2000
Вмещающая	7.20	0.3	2100

Примечание: *E* – модуль Юнга

На границе расчетной области задавались следующие условия:

$$\sigma_{xx}(0,y) = \sigma_{xx}(X,y) = \sigma_1 \cos^2\alpha + \sigma_2 \sin^2\alpha;$$
$$\sigma_{yy}(x,0) = \sigma_{yy}(x,Y) = \sigma_1 \sin^2\alpha + \sigma_2 \cos^2\alpha;$$
$$\sigma_{xy}(0,y) = \sigma_{xy}(X,y) = \sigma_{xy}(x,0) = \sigma_{xy}(x,Y) = 0.5(\sigma_1 - \sigma_2)\sin 2\alpha,$$

где σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{xy} – компоненты тензора напряжений, α – азимут направления σ_1. Таким образом, целевая функция (1) принимает вид:

$$\Psi_1(\vec{p}) = \sum_{m=1}^{2}\sum_{n=1}^{N}[s_m(x_n, y_n, z_n, \vec{p}) - s_m^*(x_n, y_n, z_n)]^2,$$

$p_1 = \sigma_1$, $p_2 = \sigma_2$ и $p_3 = \alpha$, а σ_1 и σ_2 – искомые главные напряжения вне зоны влияния целевого объекта.

На рис. 3а,б представлены изолинии целевой функции в двух сечениях $\psi_1(\sigma_1, \sigma_2, 4^o)$ и $\psi_1(\sigma_1, 14, \alpha)$. Точка минимума ψ_1: σ_1 = 24 МПа, σ_2 =14 МПа и $\alpha = 4^o$ – решение поставленной граничной обратной задачи. Значит, в окрестности Соликамского рудника горизонтальные компоненты внешнего поля напряжений больше вертикальных σ_V (коэффициенты бокового распора равны 3.43 и 2.0), что соответствует взбросовому геодинамическому режиму. Полученный результат согласуется с априорными оценками [Константинова, Аптуков, 2013].

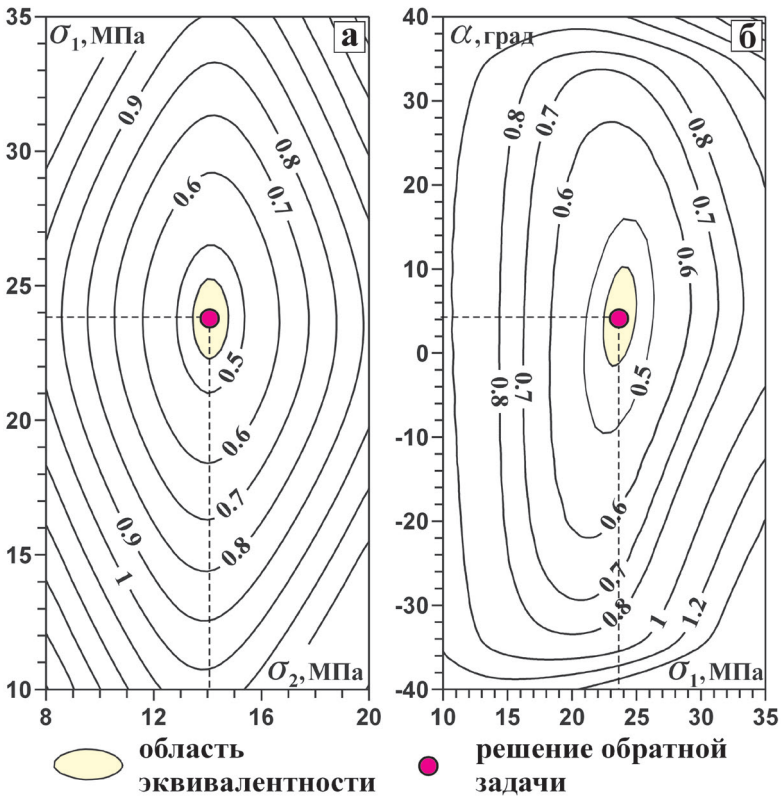

Рис. 3. Линии уровня целевой функции в различных сечениях

Реконструкция напряженного состояния углепородного массива по косвенным данным

Скорость продольных упругих волн V в горных породах зависит от среднего напряжения s [Schön, 2015]. По данным лабораторных испытаний углей средней крепости [Nazarova et al., 2017] найдено эмпирическое соотношение:

$$V(\sigma) = V_0[1 + b(1 - e^{-a\sigma})] \tag{3}$$

($V_0 = 2214$ м/с, $b = 0.219$, $a = 0.016$ 1/МПа), которое показывает, что нагруженный участок массива можно рассматривать в качестве «датчика», реагирующего на изменение напряженно-деформированного состояния в процессе отработки. Поэтому, установив пространственное распределение скорости $V_*(x, y, z)$ в некоторой области I, из (3) можно найти

$$\sigma_*(x, y, z) = \frac{1}{a} \ln \frac{b}{1 + b - V_*(x, y, z)/V_0} \tag{4}$$

и использовать $\sigma_*(x, y, z)$ в качестве входных данных s_m^* в (1) или (2) при решении обратной задачи.

Эта идея реализована на примере пласта «Тройной» (шахта «Воркутинская» ОАО «Воркутауголь»). Рисунок 4 представляет структуру целевого объекта, фрагмент объемной конечно-элементной модели области расчета G (сетка разрежена), размеры $X = 3$ км, $Y = 4$ км, $Z_1 = 0.5$ км, $Z_2 = 0.9$ км, (синие кружки – проекции координат шахтных сейсмостанций на поверхность $z = Z_1$), напряжения во внешнем поле: вертикальное $\sigma_V(z) = \rho g z$, g – ускорение свободного падения; горизонтальные $\sigma_1 = q_1\sigma_V$ и $\sigma_2 = q_2\,\sigma_V$ (q_1 и q_2 – коэффициенты бокового распора). Тогда условия на ∂G записываются следующим образом:

$$\sigma_{xx}(0, y, z) = \sigma_{xx}(X, y, z) = q_1\sigma_V(z);$$
$$\sigma_{yy}(x, 0, z) = \sigma_{yy}(x, Y, z) = q_2\sigma_V(z);$$
$$\sigma_{zz}(x, y, 0) = \sigma_V(Z_1),$$

касательные напряжения на ∂G и вертикальные смещения при $z = Z_2$ равны нулю.

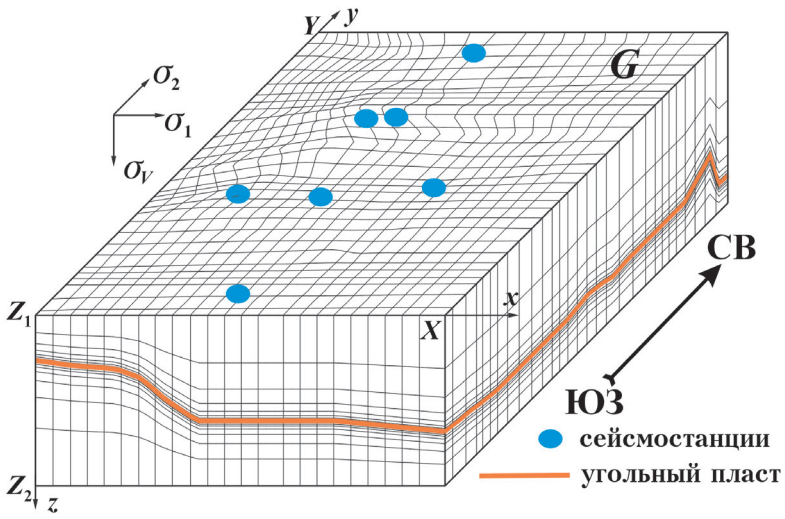

Рис. 4. Структура исследуемой области, фрагмент КЭ модели и расположение сейсмостанций

Для установления распределения скорости продольных волн использовалась пассивная сейсмическая томография; входной информацией служили данные о динамических событиях в формате (координаты гипоцентра: x_n, y_n, z_n (время первого вступления), энергия $W\}$ семи шахтных сейсмостанций (рис. 4). За первую половину 2017 г. ими зарегистрировано свыше 350 динамических событий с $W > 1000$ Дж. В результате в освещенной области I найдено распределение скорости $V_*(x, y, z)$ (рис. 5). Теперь, вычислив по (4) σ_*, получим входные данные для целевой функции (1), которая примет вид:

$$\Psi_1(\vec{p}) = \sum_{(x_n, y_n, z_n) \in I} \left[\sigma(x_n, y_n, z_n, \vec{p}) - \sigma_*(x_n, y_n, z_n)\right]^2,$$

где $p_1 = q_1, p_2 = q_2$.

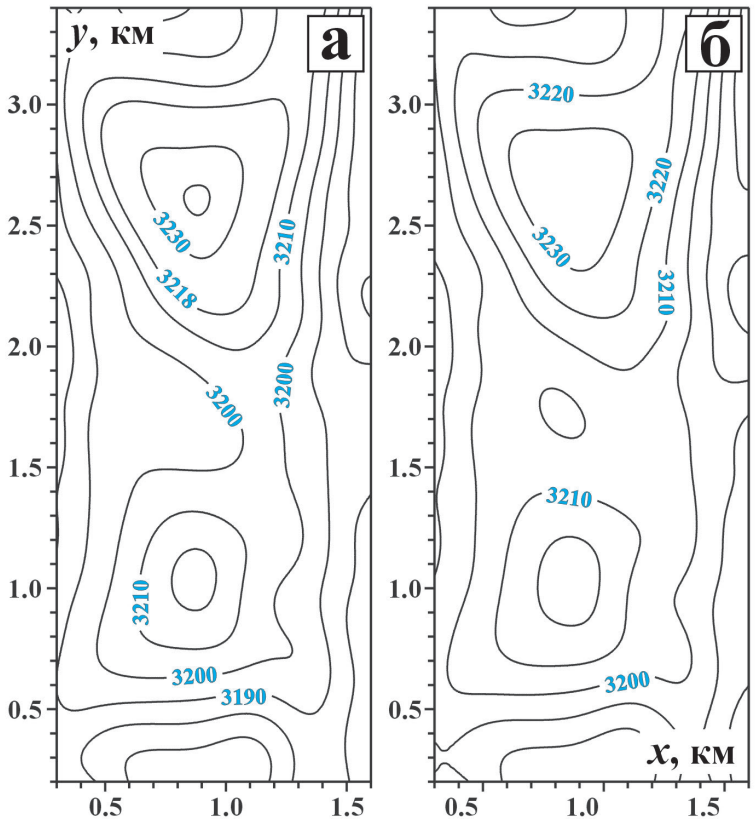

Рис. 5. Восстановленное в результате томографии распределение скорости продольных волн в горизонтальных сечениях освещенной области *I*: z = 600 м (а), z = 610 м (б)

На рис. 6 показаны изолинии, свидетельствующие о ее унимодальности, но область эквивалентности достаточно велика, поэтому даже при незначительной погрешности во входных данных отклонение от решения обратной задачи $q_1 = 0.45$, $q_2 = 0.62$ (красный кружок на рис. 6) может быть существенным.

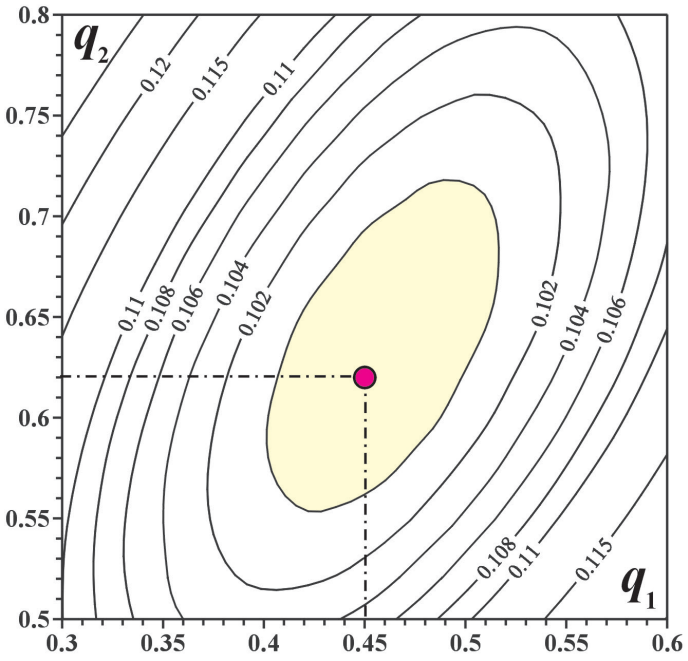

Рис. 6. Линии уровня целевой функции ψ_1

По найденным значениям коэффициентов бокового распора q_1 и q_2 определяют горизонтальные компоненты напряжений во внешнем поле, обеспечивающие наилучшее соответствие расчетного и восстановленного по косвенным (геофизическим) данным полей скоростей и, следовательно, полей напряжений. Именно эти значения q_1 и q_2 следует использовать для форвардных расчетов при моделировании отработки запасов в исследованном геотехническом объекте.

Заключение

Разработан и на реальных геотехнических объектах, и *in situ* данных апробирован метод валидации геомеханических моделей по прямой и/или косвенной информации об изменяющихся в ходе горных работ параметрах напряженно-деформированного состояния, основанный на решении обратных граничных задач определения величин и ориентации компонент поля напряжений вне зоны влияния объекта. Показано, что в окрестности шахты «Воркутинская» ОАО «Воркутауголь» превалирует сбросовый геодинамический режим (коэффициенты бокового распора $q_1 = 0.45$ и $q_2 = 0.62$), а вне шахтного поля Соликамского рудника – взбросовый ($q_1 = 2.0$ и $q_2 = 3.43$).

Дальнейшие исследования должны быть направлены на накопление фактической информации о действующих в геотехнических объектах полях напряжений и реализации разработанного метода с использованием данных различной физической природы.

Финансирование

Работа выполнена в рамках проекта НИР ИГД СО РАН (номер гос. рег. 124020700085-5).

Благодарности

Авторы благодарят д.ф.-м.н. Г. Г. Кочаряна за приглашение участвовать в выпуске журнала, посвященного юбилею академика М. А. Садовского.

Список литературы

Борщ-Компониец В.И. Практическая механика горных пород. М. : Горная книга. 2013. – 322 с.

Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. М. : Недра. 1994. – 382 с.

Геологическая карта СССР. Л. 1982.

Геологическая карта СССР (новая серия). Л. 1982.

Динник А.Н. О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты // Инж. работник. 1925. № 7. С. 1–12.

Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Трехмерная геомеханическая модель литосферы района подготовки Алтайского землетрясения 2003 г. // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 1. С. 25–28. https://elibrary.ru/oalpep

Жалковский И.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 10. С. 20–30.

Иофис М.А., Каспарьян Э.В., Турчанинов И.А. Основы механики горных пород. Л.: Недра. 1989. – 488 с.

Каспарьян Э.В., Федотова Ю.В., Кузнецов Н.Н. Развитие представлений о естественном напряженном состоянии массивов скальных пород // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 11. № 3. С. 65–79. https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.3.65-79

Константинова С.А., Аптуков В.Н. Некоторые задачи механики деформирования и разрушения соляных пород. Новосибирск : Наука, 2013. – 191 с.

Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М. : ГЕОС. 2016. – 424 с. https://elibrary.ru/yvwlrv

Лобацкая Р.М., Краснораменская Т.Г. Объемная неотектоническая разломно-блоковая модель Алтае-Саянской складчатой области как основа для анализа и прогноза сейсмичности // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2008. № 6. С. 132–142.

Назарова Л.А. Техногенная сейсмичность и эволюция полей напряжений при разработке месторождений полезных ископаемых: моделирование и эксперимент: Третья Школа молодых ученых «Мониторинг природных и техногенных систем». 2021. https://www.permsc.ru/images/docs/news/Программа_Третья_школа.pdf

Попов А.Н., Головкина Н.Н., Исмаков Р.А. Определение коэффициента бокового распора пористых горных пород по промысловым данным // Нефтегазовое дело. 2005. № 2. С. 15.

Садовский М.А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. М. : Наука. 2004. – 440 с.

Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф., Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука. 1987. – 105 с.

Тектоника Сибири. Новосибирск : Изд. СОАН СССР. Т. 1. 1962.

Тупысев М.К. Особенности определения деформационных характеристик горных пород пластов продуктивных залежей // Актуальные проблемы нефти и газа. 2022. № 1. С. 90–97. https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-36.art5

Heim A. Untersuchungen uber den mechanismus der gebirgsbildung, Bd. 1–2. Atlas. Basel. 1878.

Hudson J.A. Rock Testing and Site Characterization. Principles, Practice and Projects. Pergamon. 1993. – 932 p.

Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R. Fundamentals of Rock Mechanics: 4th Edition. Wiley-Blackwell. 2007. – 488 p.

Li P., Cai M., Gorjian M. et al. Interaction between in situ stress states and tectonic faults: A comment // Int. J. Miner. Metall. Mater. 2023. Vol. 30. P. 1227–1243. https://doi.org/10.1007/s12613-023-2607-8

Morozov V.N., Tatarinov V.N., Manevich A.I., Losev I.V. Analogy method to determine the stress-strain state of structural-tectonic blocks of the Earth's crust for the disposal of radioactive wast // Russ. J. Earth. Sci. 2019. Vol. 19. ES6001. http://dx.doi.org/10.2205/2019ES000687

Nazarov L.A., Nazarova L.A. A geophysical data interpretation method for the reconstruction of the stressed-strained state of a rock massif // Doklady Earth Sci. 2004. Vol. 395 (3). P. 429–432.

Nazarova L.A. Estimating the stress and strain fields of the Earth's crust on the basis of seismotectonic data // J. Min. Sci. 1999. Vol. 35 (1). P. 26–35. https://doi.org/10.1007/BF02562442

Nazarova L.A., Zakharov V.N., Shkuratnik V.L. et al. Use of tomography in stress-strain analysis of coal-rock mass by solving boundary inverse problems // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. P. 1048–1055. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.278

Schön J.H. Physical properties of rock, Handbook of Petroleum Exploration and Production. Elsevier. 2015. – 494 p.

Zang A., Stephansson O. Stress Field of the Earth's Crust. Springer. 2010. – 322 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8444-7

PECULIARITIES OF DESINING GEOMECHANICAL MODELS OF LARGE-SCALE NATURAL AND GEOTECHNICAL OBJECTS BASED ON DIRECT AND INDIRECT DATA ON STRESS FIELDS

© 2024 L. A. Nazarova*, L. A. Nazarov, A. V. Panov, A. A. Skulkin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

**E-mail: larisa.a.nazarova@mail.ru*

Substantiation of technologies for opening and developing solid mineral deposits, seismic zoning of territories for the purposes of large-scale construction is carried out using geomechanical models, so their validation is an urgent task. The article discusses some aspects related to the choice of the size and orientation of the computational domain, as well as the quantitative assessment of the stress field components outside the zone of influence of the target object. Based on a comparative analysis of the linear dimensions of tectonic blocks of the first and second scale levels of the Altai-Sayan folded region, the hierarchy coefficient according to M. A. Sadovsky $k = 3.17–3.22$ was found, which is proposed to be used in designing nested geomechanical models for the region of the main iron ore deposits of Gornaya Shoria. A method for quantitative assessing the parameters of the external stress field has been developed and tested on real geotechnical objects of various scales (Solikamsk mine and coal seam in the extraction section of the Vorkutinskaya mine). The method is based on solving inverse boundary value problems using direct (measuring hydraulic fracturing) and indirect (passive seismic tomography using the coordinates of the hypocenters of dynamic events and the times of the first arrivals recorded by mine seismic stations) data. The implementation of this method made it possible to determine the principal horizontal stresses in the external stress field of the Solikamsk mine of 14 and 24 MPa, indicating an overthrust geodynamic regime in the vicinity of this geotechnical object.

Keywords: geomechanical model, hierarchy of block structures, stress, lateral thrust coefficient, inverse problem, measuring hydraulic fracturing, seismic tomography.