

Методика численного моделирования полей напряжений в районе размещения угольных шахт

Д.Ж. Акматов¹✉, Х.Ю. Евлоев¹, А.Д. Меллер², Т.А. Манукян¹, В.Н. Чадин¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

² Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация

✉ dastan.akmatov.1994@mail.ru

Резюме: При разработке угольных месторождений подземным способом активизируются опасные геодинамические явления и процессы на локальном и региональном уровнях. Для определения риска их развития необходимо выполнять оценку напряженного состояния района размещения угольных шахт. В статье представлена методика численного моделирования полей напряжений в районах разработки угольных месторождений подземным способом. Было смоделировано напряженно-деформированное состояние фрагмента геологической среды в районе г. Ленинска-Кузнецкого, где эксплуатируются несколько крупных угольных шахт (им. Кирова, им. Рубана, им. 7-го ноября и др.). Расчеты напряжений были выполнены методом конечных элементов в программном продукте «COMSOL». В качестве расчетной схемы была использована карта разломной тектоники района центрального Кузбасса. Граничные условия и физико-механические свойства модели задавались на основе геолого-геофизических исследований территории. В результате были получены и проанализированы компоненты тензора напряжений в ситуации до и после выработки угольного месторождения.

Ключевые слова: моделирование, методика, уголь, шахта, напряженно-деформированное состояние, добыча угля

Для цитирования: Акматов Д.Ж., Евлоев Х.Ю., Меллер А.Д., Манукян Т.А., Чадин В.Н. Методика численного моделирования полей напряжений в районе размещения угольных шахт. *Горная промышленность*. 2023;(1):39–44. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-39-44>

Methodology for numerical modeling of stress fields in vicinities of coal mines

D.Zh. Akmatov¹✉, H.Y. Evloev¹, A.D. Meller², T.A. Manukyan¹, V.N. Chadin¹

¹ National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

² RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ dastan.akmatov.1994@mail.ru

Abstract: Underground mining of coal deposits intensifies dangerous geodynamic phenomena and processes at the local and regional levels. The risk of their development can be determined by assessing the stress state of the rock masses in the areas where coal mines are located. The article presents a methodology for numerical modeling of the stress fields in the areas of underground coal mining. The stress-and-strain state was modeled for a segment of the geological environment in vicinities of the city of Leninsk-Kuznetsky, where several large coal mines, e.g. the Kirov Mine, the Ruban Mine, the 7-th of November Mine and others, are operated. The stress calculations were made with the Finite Element Analysis using the COMSOL software suite. A map of tectonic faults in the Central Kuznetsk region was used as the computational model. The boundary conditions as well as the physical and mechanical properties of the model were defined on the basis of geological and geophysical surveys of the territory. As the result, the stress components were obtained and analyzed for the conditions before the beginning and upon completion of the coal deposit mining.

Keywords: deling, methodology, coal, mine, stress-and-strain state, coal mining

For citation: Akmatov D.Zh., Evloev H.Y., Meller A.D., Manukyan T.A., Chadin V.N. Methodology for numerical modeling of stress fields in vicinities of coal mines. *Russian Mining Industry*. 2023;(1):39–44. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-39-44>

Введение

Ленинское каменноугольное месторождение территориально принадлежит к северо-западной части Кузнецкого угольного бассейна, тяготея к Кузнецкому Алатау. Кузнецкий угольный бассейн представляет собой крупный синклинорий, имеющий в плане форму неправильного четырехугольника, длинная ось которого ориентирована в направлении северо-запад – юго-восток [1]. В геоморфологическом отношении регион представляет собой котловину, окруженную горными сооружениями: с востока – Кузнецким Алатау, с юга – Горной Шорией, с юго-запада и запада – Кольвань-Томской складчатой зоной. Кузнецкий Алатау на общем фоне Алтае-Саянской складчатой области представляет совокупность горных массивов, отчетливо выраженных в рельефе в виде отдельных выступов [1]. Современная геодинамическая активность выражается в росте новейших поднятий за счет сокращения впадин, что обусловлено общим поднятием территории [2]. Это подтверждают геоморфологические данные, результаты повторного нивелирования, данные наблюдений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), а также самопроизвольное газовыделение на территории Ленинского каменноугольного месторождения (ЛКМ) [2–4].

За долгое время эксплуатации ЛКМ было накоплено большое количество геолого-тектонических и сейсмологических данных о состоянии данного района [2–8]. Несмотря на это практически отсутствуют оценки полей напряжений района ЛКМ, которые могли бы быть полезны при геоэкологической оценке района. Масштабное ведение очистных горных работ вызывает массивное антропогенное изменение геологической среды, что приводит к негативному воздействию на геологическую среду, водные объекты, земную поверхность и биосферу.

В качестве геометрической модели мы использовали схему разломной тектоники района центрального Кузбасса [4; 6] с нанесением на нее намечаемых к отработке шахтных полей¹. Для задания тектонической составляющей напряжений мы использовали сложившиеся представления о направлении осей главных тектонических напряжений по результатам морфотектонических исследований Кузнецкой котловины [2; 4].

Моделирование напряженно-деформированного состояния ЛКМ выполнено с применением метода расчета НДС блочных гетерогенных массивов, нарушенных системой тектонических разломов, причем под разломом понимается объемная зона диспергации горных пород с упругим модулем, существенно более низким по сравнению с окружающими породами [9; 10].

Структурно-тектоническая модель Ленинского каменноугольного месторождения

В геологическом отношении Ленинское каменноугольное месторождение находится в сложной геодинамической обстановке. Угольные пласты месторождения образованы Ленинской синклиналью, которая представляет собой широкую складку с асимметричными крыльями и пологой мульдой. Мульда синклинали полого погружается от центральной части поля на северо-запад (2–3°) и юго-восток (3–5°). Юго-западное крыло складки осложнено Ленинской антиклиналью с углами падения крыльев от 20 до 40° [11].

Область Ленинского каменноугольного месторождения по результатам интерпретации морфотектонических исследований [4] относится к границе между двумя неотектоническими блоками Присалаирского и Кемеровского подрайонов. Обнаженность зон новейших нарушений обычно отсутствует, поскольку они перекрыты предгорными делювиальными шлейфами в случае дифференцированных движений по ним или аллювиальными отложениями, если отсутствуют существенные вертикальные подвижки [4]. Мощность покровного комплекса составляет 20–40 м [4]. Вместе с тем высоты соседствующих неотектонических блоков, входящих в район моделирования, сопоставимы и отличаются на 20–30 м по материалам [2; 4].

Таким образом, для моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) района Ленинского каменноугольного месторождения была использована структурно-тектоническая схема разломной тектоники (рис. 1), верифицированная геофизическими исследованиями, результаты которых приведены в работах [4; 6–7]. Было смоделировано НДС фрагмента геологической среды размерами 150×140 км. Глубина моделируемого слоя соотносится с глубиной намечаемых для разработки (или уже разработанных) шахтных полей и находится в пределах 500–1000 м от земной поверхности. Моделируемый слой сложен упругими и хрупкими породами – углем, аргиллитом, алевролитами и песчаниками. В рамках упругой постановки задачи моделируется НДС упругого изотропного слоя с модулем Юнга $E = 8 \cdot 10^3$ МПа, нарушенного системой тектонических разломов с модулем Юнга на два порядка ниже² и общим коэффициентом Пуассона $\mu = 0,25$. Значение упругого модуля геосреды, принятое в модели, соответствует упругому модулю, пересчитанному из значений скоростей поперечных сейсмических волн по сейсмическим данным (скорости поперечных волн указываются 3,6–3,9 км/с, модуль Юнга, им соответствующий, $(1,9–2,2) \cdot 10^4$ МПа). Физико-механические параметры модели приняты нами ориентировочно, исходя из того, что результаты моделирования нацелены на получение качественных оценок НДС района, а не количественных.

Под разломом в модели понимается механически диспергированная среда с шириной разломной зоны до 500 м [10]. Учитывая этот факт, можно принять падение разломов вертикальным, т.к. объектом анализа является конкретный интервал геосреды, в котором наиболее интенсивно ведутся и будут вестись горные работы. Внешнее поле тектонических напряжений задано доминирующим напряжением сжатия σ_y с субмеридиональной осью ориентации, которое согласуется с материалами морфотектонических [2; 4] и сейсмологических [12] исследований. Были использованы значения напряжений: $\sigma_{xx} = 10$ МПа, $\sigma_{yy} = 30$ МПа.

Модель структурной схемы после отработки шахтных полей заключается в следующем. На схему разломной тектоники были вынесены границы основных шахтных полей, намеченных для отработки, находящихся в интервале 500–1000 м от земной поверхности³ [9]. Ведение выемочных работ, проходка горных выработок и вообще масштабное ведение подземных горных работ в границах шахтных полей образуют объем диспергированных пород. В первую очередь это связано с технологией ведения очистных

¹ База данных Государственных геологических карт (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского Российской академии наук). URL: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html>

² База данных Государственных геологических карт (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского Российской академии наук). URL: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html>

³ База данных Государственных геологических карт (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского Российской академии наук). URL: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html>

работ, а именно управлением горным давлением полным обрушением кровли для свиты угольных пластов. Выемка пластов угля на разных глубинах с обрушением пород кровли обуславливает появление зон, значительных по площади, с пониженными физико-механическими (? свойствами, характеристиками) по отношению к вмещающим породам [13; 15]. Связано это с физическим появлением пустот и заполнением этих пустот водой [14].

Предметом анализа являются карты компонент тензора напряжений σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{xy} и интенсивности напряжений σ_i в области шахтных полей Ленинского каменноугольного месторождения и агломерации г. Ленинска-Кузнецкого до и после отработки шахтных полей.

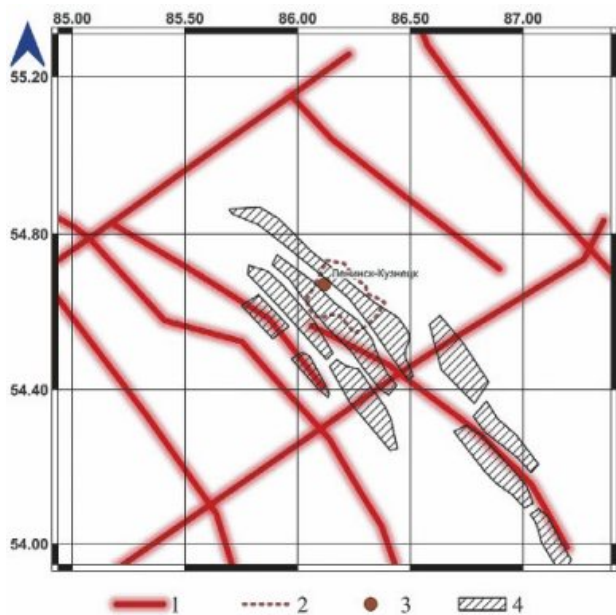


Рис. 1
Схема разломной тектоники области Ленинского каменноугольного месторождения по материалам [4; 6-7] и границ основных шахтных полей:
1 – тектонические разломы;
2 – агломерация г. Ленинска-Кузнецкого;
3 – г. Ленинск-Кузнецкий;
4 – намеченные к отработке шахтные поля ЛКМ, они же области предполагаемой диспергации пород

Fig. 1
A schematic map of the tectonic faults in the area of the Leninsk coal deposit based on the materials [4; 6-7] and the boundaries of the main mine takes:
1 – tectonic faults;
2 – the Leninsk-Kuznetsky urban agglomeration;
3 – the city of Leninsk-Kuznetsky;
4 – the mine fields of the Leninsk coal deposit planned for development, they are also zones of the assumed rock dispersion

Метод моделирования напряженно-деформированного состояния

В исследовании нами использованы программный комплекс и методика расчета напряженно-деформированного состояния блочных гетерогенных массивов, нарушенных системой тектонических разломов во внешнем поле тектонических напряжений [16]. Среда внутри исследуемого района принимается изотропно-упругой, нарушенной системой тектонических разломов и зонами выработанных пространств.

При моделировании под разломом и зонами отработанных угольных пластов принимается изотропно-упругая

среда с модулем упругости в два раза ниже пород окружающего массива.

Расчет напряженно-деформированного состояния в массиве производится методом конечных элементов в форме перемещений на основе четырехугольных изопараметрических элементов [16]. Выбор метода конечных элементов как метода вычислений обусловлен как физическими соображениями, обеспечивающими условия минимизации полной потенциальной энергии деформации для всего массива, так и эффективностью реализации математических вычислений.

Соотношения между напряжениями и деформациями принимаются по обобщенному закону упругости Гука:

$$\sigma_{ij} = D_{ij} \times \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений:

$$\sigma_{ij} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} \end{Bmatrix}; \quad (2)$$

ε_{ij} – компоненты тензора упругих деформаций:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0,5\varepsilon_{xy} \\ 0,5\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{Bmatrix}; \quad (3)$$

$D(\mu, E)$ – матрица упругих коэффициентов для изотропно-упругого материала, где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга, Па.

Интенсивности напряжений рассчитываются по следующей формуле:

$$\sigma_i = (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xx} \times \sigma_{yy} + 3 \times \sigma_{xy}^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Изменение НДС исследуемого района анализируется по величине разности интенсивности напряжений до и после отработки шахтных полей:

$$\Delta\sigma_i = \langle \sigma_i \rangle_I - \langle \sigma_i \rangle_{II}, \quad (5)$$

где $\langle \sigma_i \rangle_I$ и $\langle \sigma_i \rangle_{II}$ – интенсивность напряжений в произвольной точке до и после отработки шахтных полей соответственно.

При моделировании НДС геологического массива в системе координат y, x (совпадающие с направлением север-юг и запад-восток) задается внешнее поле тектонических напряжений исходя из исследований [2-6]. Были использованы значения напряжений: $\sigma_{xx} = 10$ МПа, $\sigma_{yy} = 30$ МПа.

Результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния Ленинского каменноугольного месторождения

На рис. 2 представлена карта интенсивности напряжений ЛКМ до начала отработки шахтных полей. Фоновые значения σ_i в нетронутом массиве находятся в пределах 10–20 МПа. Вблизи агломерации г. Ленинска-Кузнецкого и Ленинского месторождения выделяется зона повышенных значений интенсивности напряжений более 35 МПа, вытянутая в северо-северо-восточной ориентации. В эту зону попадает одно из намечаемых к отработке шахтных полей.

На следующей итерации было рассчитано НДС исследуемого района в том случае, когда все намеченные шахтные поля в моделируемом интервале глубины 500–100 м будут

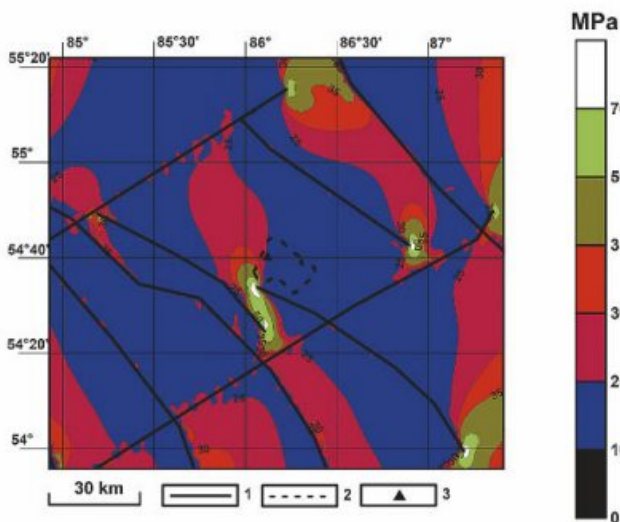


Рис. 2
Карта интенсивности напряжений σ_i до начала отработки шахтных полей:
1 – тектонические разломы;
2 – агломерация г. Ленинска-Кузнецкого;
3 – г. Ленинск-Кузнецкий

Fig. 2
A map of stress intensity σ_i before the beginning of mining operations at the mine takes:
1 – tectonic faults;
2 – the Leninsk-Kuznetsky urban agglomeration;
3 – the city of Leninsk-Kuznetsky

отработаны. На рис. 3 представлена карта интенсивности напряжений после отработки шахтных полей.

После отработки шахтных полей НДС в районе агломерации г. Ленинска-Кузнецкого и Ленинского месторождения область повышенных напряжений значительно расшири-

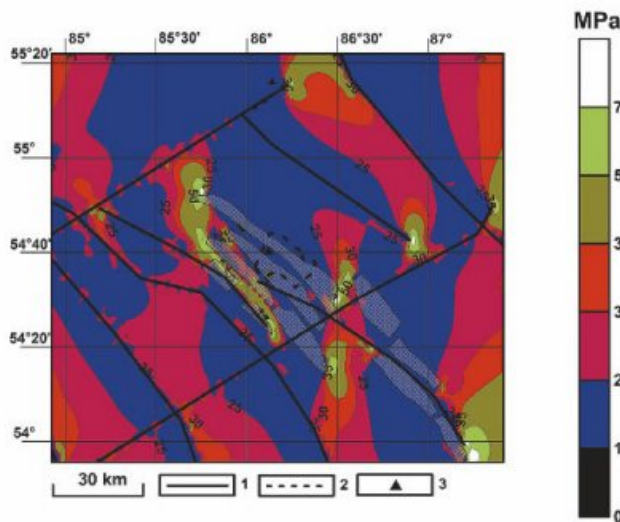


Рис. 3
Карта интенсивности напряжений σ_i после отработки шахтных полей:
1 – тектонические разломы;
2 – агломерация г. Ленинска-Кузнецкого;
3 – г. Ленинск-Кузнецкий;
4 – намеченные к отработке шахтные поля ЛКМ, они же области предполагаемой диспергации пород

Fig. 3
A map of stress intensity σ_i upon completion of mining operations at the mine takes:
1 – tectonic faults;
2 – the Leninsk-Kuznetsky urban agglomeration; 3 – the city of Leninsk-Kuznetsky;
4 – the mine fields of the Leninsk coal deposit planned for development, they are also zones of the assumed rock dispersion

ется в северо-западном и юго-восточном направлениях, охватывая территорию примерно в 2,5 раза большую, чем до отработки шахтных полей. Также формируется новая область повышенных значений интенсивности напряжений и напряжений сдвига на конце шахтного поля в юго-восточном направлении, разрабатываемого в настоящее время двумя шахтами – им. С.М. Кирова и «Полысаевской».

На рис. 4 приведена карта разности интенсивности напряжений и направлений наибольшего градиента их изменения $\Delta\sigma_i$, вычисленная по формуле (5). На рис. 5 приведена карта отношения главных действующих напряжений σ_{yy}/σ_{xx} в ситуации до и после отработки шахтных полей.

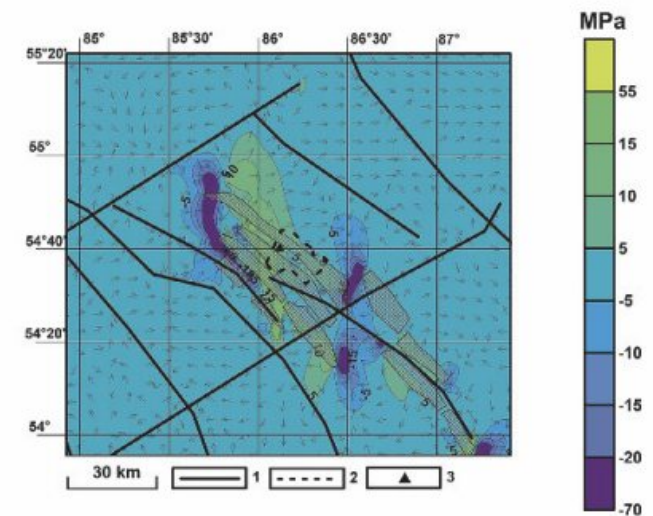


Рис. 4
Разность интенсивности напряжений $\Delta\sigma_i$ до и после отработки шахтных полей:
1 – тектонические разломы;
2 – агломерация г. Ленинска-Кузнецкого;
3 – г. Ленинск-Кузнецкий

Fig. 4
The difference of stress intensities $\Delta\sigma_i$ before the beginning and upon completion of mining operations at the mine takes:
1 – tectonic faults;
2 – the Leninsk-Kuznetsky urban agglomeration;
3 – the city of Leninsk-Kuznetsky

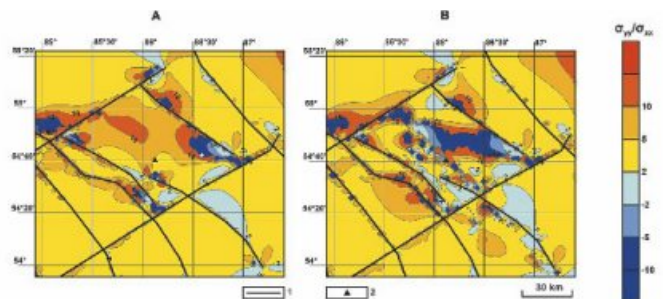


Рис. 5
Карта отношения главных действующих напряжений σ_{yy}/σ_{xx} до (А) и после (Б) отработки шахтных полей:
1 – тектонические разломы;
2 – г. Ленинск-Кузнецкий

Fig. 5
A map of the principal effective stress ratios σ_{yy}/σ_{xx} before the beginning (А) and upon completion (Б) of mining operations at the mine takes:
1 – tectonic faults;
2 – the city of Leninsk-Kuznetsky

Диапазон сброшенной интенсивности напряжений 0–5 МПа занимает существенную площадь и является фоновым. Максимальные значения разности интенсивности напряжений $\Delta\sigma_i$ достигают 15–20 МПа. Очистные работы формируют области высокой интенсивности напряжений – зоны повышенной энергонасыщенности среды.

Необходимо отметить, что существует неопределенность в интерпретации результатов моделирования, т.к. за длительный период отработки угольного месторождения может произойти релаксация напряжений вследствие наведенных сейсмических явлений и перераспределения напряжений в результате медленных криповых движений.

Выводы

Развитие горных работ при отработке свиты угольных пластов ЛКМ изменяет горно-геологические и геомеханические условия во вмещающем массиве, приводит к активизации негативных и опасных геодинамических процессов и явлений: индуцированные землетрясения, горно-тектонические удары, горные удары, смещения земной поверхности, создание новых поверхностей ослабления в геологическом массиве, изменение физико-механических свойств пород и т.д.

Это обуславливается несколькими взаимосвязанными и взаимовлияющими факторами: перемещением большого

объема горных пород из геологической среды на земную поверхность и, как следствие, физическим появлением большого объема выработанного пространства; изменением напряженно-деформированного состояния района ЛКМ; изменением гидрологического режима района; изменением физико-механических свойств геологической среды.

Анализ результатов моделирования показал наличие локальных областей повышенных напряжений в геологическом массиве, приуроченных к тектоническим структурам и областям разработки угольных пластов. Район Ленинского каменноугольного месторождения на момент окончания отработки шахтных полей потенциально включает в себя три области сброшенной интенсивности напряжений, наличие которых необходимо учитывать при оценке безопасности ведения горных работ.

В заключение необходимо отметить, что полученные величины характеристик НДС целесообразно рассматривать только как качественную иллюстрацию. Несмотря на это результаты численного моделирования НДС Ленинского каменноугольного месторождения можно использовать как данные для качественной оценки влияния эксплуатации шахт на вмещающую геологическую среду для условий Кузбасса.

Список литературы

1. Сидоренко А.В. (ред.) *Геология СССР*. Т. 14. Западная Сибирь (Алтайский край, Кемерово, Новосибирская, Омская, Томская области). Ч. 1. Геологическое описание. М.: Недра; 1967. 664 с.
2. Панина Л.В., Зайцев В.А. Неотектоника и геодинамика кузнецкой впадины. *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. 2012;(6):13–20.
3. Карташев М.П., Есиков Н.П. Изучение деформаций земной поверхности на Кузбасском полигоне. В кн.: *Современные движения и деформации земной коры на геодинамических полигонах*. М.: Наука; 1983. С. 102–105.
4. Новиков И.С., Черкас О.В., Мамедов Г.М., Симонов Ю.Г., Симонова Т.Ю., Наставко В.Г. Этапы активации и тектоническая делимость Кузнецкого угольного бассейна (Южная Сибирь). *Геология и геофизика*. 2013;54(3):424–437.
5. Адушкин В.В. Триггерная сейсмичность Кузбасса. В кн.: *Триггерные эффекты в геосистемах: тезисы докладов III Всероссийского семинара-совещания, Москва, 16–19 июня 2015 г.* М.: Издательство ГЕОС; 2015. С. 8–28.
6. Яковлев Д.В., Лазаревич Т.И., Цирель С.В. Природно-техногенная сейсмоактивность Кузбасса. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2013;(6):20–34.
7. Лазаревич Т.И., Поляков А.Н. Горный мониторинг сейсмической и геодинамической безопасности Кузбасса. *Маркшейдерский вестник*. 2010;(1):16–22.
8. Emanov A.A., Emanov A.F., Fateev A.V., Leskova E.V. Simultaneous Impact of Open-Pit and Underground Mining on the Subsurface and Induced Seismicity. *Seismic Instruments*. 2018;54(4):479–487. <https://doi.org/10.3103/S0747923918040035>
9. Морозов В.Н., Татаринев В.Н., Колесников И.Ю., Маневич А.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральной зоны сильного землетрясения в Иране (26 декабря 2003 г. $M_w = 6.6$). *Физика Земли*. 2018;(4):68–78. <https://doi.org/10.1134/S0002333718040087>
10. Manevich A.I., Kolikov K.S., Egorova E.A. Geocological aspects of stress-strain state modeling results of Leninsky coal deposit (Kuzbass, Russia). *Russian Journal of Earth Science*. 2019;19:ES4002. <https://doi.org/10.2205/2019ES000663>
11. Попов Ю.Н. Некоторые особенности тектоники шахтных полей Северо-Восточной части Ленинского района Кузбасса. *Известия Томского политехнического института им. С.М. Кирова*. 1976;236:119–128. Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/12111>
12. Овсюченко А.Н., Рогожин Е.А., Новиков С.С., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Акбиев Р.Т., Могушков И.М. Палеогеологические и тектонические исследования сейсмоопасных территорий юга Кузбасса. *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2010;(6):35–45.
13. Batugin A.S., Batugina I.M., Lan T. Tectonophysical model of fault tectonic rock burst with wing sliding. *Journal of Liaoning Technical University, Natural Science*. 2016;35:561–565.
14. Батугин А.С., Климанова В.Г. Затопление ликвидируемых шахт как возможная причина техногенных землетрясений в горно-промышленных районах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2000;(2):181–184.
15. Tarasenko I.A., Zinkov A.V., Chudaev O.V., Vetoshkina A.V., Holodilov I.I. Technogenic effect of liquidation of coal mines on earth's entrails: hydrogeochemical aspect. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;87(4):042022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/4/042022>
16. Морозов В.Н., Маневич А.И., Татаринев В.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния и геодинамическое районирование в сейсмически активных районах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(8):123–132. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-8-0-123-132>

References

1. Sidorenko A.V. (ed.) *Geology of the USSR*. Volume 14. Geological description. Western Siberia. Moscow: Nedra; 1967. 664 p. (In Russ.)
2. Panina L.V., Zaitsev V.A. Neotectonics and geodynamics of the Kuznetsk Basin. *Moscow University Geology Bulletin*. 2012;67(6):332–339. (In Russ.)
3. Kartashev M.P., Esikov N.P. The study of deformations of the earth's surface on the Kuzbass polygon. In: *Modern movements and deformations of the earth's crust on geodynamic polygons*. Moscow: Nauka; 1983, pp. 102–105. (In Russ.)
4. Novikov I.S., Cherkas O.V., Mamedov G.M., Simonov Yu.G., Simonova T.Yu., Nastavko V.G. Activity stages and tectonic division in the Kuznetsk Basin, Southern Siberia. *Geologiya i geofizika*. 2013;54(3):424–437. (In Russ.)
5. Adushkin V.V. Trigger seismicity of the Kuznetsk Basin. In: *Trigger effects in geosystems. Theses of the reports of the III All-Russian seminar-meeting, Moscow, 16–19 June 2015*. Moscow: Izdatelstvo GEOS; 2015, pp. 8–28. (In Russ.)
6. Yakovlev D.V., Lazarevich T.I., Tsirel' S.V. Natural and induced seismic activity in Kuzbass. *Journal of Mining Science*. 2013;49(6):862–872. <https://doi.org/10.1134/S1062739149060038>
7. Lazarevich T.I., Polyakov A.N. Mining monitoring of seismic and geodynamic safety of Kuzbass. *Mine Surveying Bulletin*. 2010;(1):16–22. (In Russ.)
8. Emanov A.A., Emanov A.F., Fateev A.V., Leskova E.V. Simultaneous Impact of Open-Pit and Underground Mining on the Subsurface and Induced Seismicity. *Seismic Instruments*. 2018;54(4):479–487. <https://doi.org/10.3103/S0747923918040035>
9. Morozov V.N., Tatarinov V.N., Kolesnikov I.Y., Manevich A.I. Modeling the stress-strain state in the epicentral zone of a strong earthquake in Iran (December 26, 2003, $M_w = 6.6$). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2018;54(4):602–611. <https://doi.org/10.1134/S1069351318040080>
10. Manevich A.I., Kolikov K.S., Egorova E.A. Geocological aspects of stress-strain state modeling results of Leninsky coal deposit (Kuzbass, Russia). *Russian Journal of Earth Science*. 2019;19:ES4002. <https://doi.org/10.2205/2019ES000663>
11. Popov Yu.N. Some features of the tectonics of mine fields in the North-Eastern part of the Leninsky district of Kuzbass. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 1976;236:119–128. (In Russ.) Available at: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/12111>
12. Ovsyuchenko A.N., Rogozhin Ye.A., Novikov S.S., Marakhanov A.V., Larkov A.S., Akbiyev R.T., Mogushkov I.M. Paleogeologic and tectonic studies of earthquake areas in the south Kuzbass. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2010;(6):35–45. (In Russ.)
13. Batugin A.S., Batugina I.M., Lan T. Tectonophysical model of fault tectonic rock burst with wing sliding. *Journal of Liaoning Technical University, Natural Science*. 2016;35:561–565.
14. Batugin A.S., Klimanova V.G. Flooding of the liquidated mines as a possible cause of technogenic earthquakes in mining regions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2000;(2):181–184. (In Russ.)
15. Tarasenko I.A., Zinkov A.V., Chudaev O.V., Vetoshkina A.V., Holodilov I.I. Technogenic effect of liquidation of coal mines on earth's entrails: hydrogeochemical aspect. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;87(4):042022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/4/042022>
16. Morozov V.N., Manevitch A.I., Tatarinov V.N. Stress state modeling and geodynamic zoning in seismically active regions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(8):123–132. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-8-0-123-132>

Информация об авторах

Акматов Дастан Женишбекович – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: dastan.akmatov.1994@mail.ru

Евлоев Хусейн Юсупович – аспирант кафедры геотехнологий освоения недр Горного института НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: khusein.evloev@gmail.com

Меллер Александр Дмитриевич – аспирант департамента недропользования и нефтегазового дела, Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: meller33@gmail.com

Манукян Тигран Арменович – аспирант кафедры геотехнологий освоения недр Горного института НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: tigman96@gmail.com

Чадин Владимир Николаевич – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: vnchadin@gmail.com

Information about the authors

Dastan Zh. Akmatov – Postgraduate Student, Department of Geology and Surveying at the Mining Institute of the National Research Technical University “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: dastan.akmatov.1994@mail.ru

Husein Yu. Evloev – Postgraduate Student, Department of Geotechnologies and Mineral Resources Development of the Mining Institute, Moscow, Russian Federation; e-mail: khusein.evloev@gmail.com

Aleksandr D. Meller – Postgraduate Student, Department of Subsoil Use and Oil and Gas Business at the Peoples' Friendship University of Russia “RUDN University”, Moscow, Russian Federation; e-mail: meller33@gmail.com

Tigran A. Manukyan – Postgraduate Student, Department of Geotechnologies and Mineral Resources Development of the Mining Institute, Moscow, Russian Federation; e-mail: tigman96@gmail.com

Vladimir N. Chadin – Postgraduate Student, Department of Geology and Surveying at the Mining Institute of the National Research Technical University “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: vnchadin@gmail.com

Article info

Received: 13.12.2022

Revised: 11.01.2023

Accepted: 13.01.2023

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.12.2022

Поступила после рецензирования: 11.01.2023

Принята к публикации: 13.01.2023