



**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОНВЕРГЕНТНОЙ ГОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

В. А. Еременко¹, Ю. П. Галченко², А. В. Мясков¹, М. А. Косырева¹

¹*Национальный исследовательский технологический университет “МИСИС”,
E-mail: prof.eremenko@gmail.com, myaskov@misis.ru, marinkosyreva@gmail.com,
Ленинский проспект 6, г. Москва 119049, Россия*

²*Институт проблем комплексного освоения недр им. Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: schtrek33@mail.ru, Крюковский тупик 4, г. Москва 111020, Россия*

Выполнены фундаментальные исследования по обоснованию путей реализации идей и принципов конвергенции знаний технических и биологических наук при развитии минерально-сырьевого комплекса. Предложена методологическая концепция создания конвергентной горной технологии подземной разработки мощных рудных месторождений. Рассмотрены конструктивные особенности ее “каркасного” варианта и обоснован рациональный порядок отработки выемочных блоков. Осуществлено численное моделирование напряжений и упругих деформаций на контуре каркаса и очистных блоков при различных критериях нарушенности горного массива.

Природно-технические системы, горно-технические системы, напряженно-деформированное состояние массива, конвергентная горная технология, каркас, камеры, флюидонесущие горизонты, закладка, программы Map3D и RocData

**STUDY OF ROCK MASS STRESS STATE
WHEN USING CONVERGENT MINING TECHNOLOGY**

V. A. Eremenko¹, Yu. P. Galchenko², A. V. Myaskov¹, and M. A. Kosyreva²

¹*College of Mining, National University of Science and Technology—MISIS,
E-mail: prof.eremenko@gmail.com, myaskov@misis.ru, marinkosyreva@gmail.com,
Leninskiy pr., 6, Moscow 119049, Russia*

²*Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences,
E-mail: schtrek33@mail.ru, Kryukovskiy tupik 4, Moscow 111020, Russia*

The basic research aimed to substantiate implementation of ideas and principles of converging engineering and biological sciences in the sphere of mineral mining is accomplished. A methodological concept is proposed to create a convergent technology for underground mining of thick ore deposits. The design features of a new frame-type technology are discussed and the efficient procedure of extracting ore panels is justified. Numerical modeling of stresses and elastic strains at the boundaries of stoping blocks is carried out at various criteria of rock mass disturbance.

Natural-engineering systems, mining-engineering systems, stress-strain state, convergent mining technology, frame, rooms, fluids containing horizons, backfill, Map3D and RocData software

При использовании современных горных технологий, основанных на экстенсивных методах преодоления горного давления, неизбежной платой за локальную геомеханическую безопасность добычных работ является образование очагов опасных напряжений в налегающих массивах [1, 2]. В этих условиях обеспечение геомеханической безопасности связано с решением фундаментальной проблемы по снижению влияния антропогенного разрушения литосферы на процессы, протекающие в ее динамических структурах. Цель работы — создание методологии новой горной технологии на идее и принципах конвергенции знаний технических и биологических наук [3–5].

Теоретические исследования. Согласно современным представлениям о литосфере как сплошной среде с разномасштабными неоднородностями, избыточные напряжения (или их эквивалент — неупругие напряжения) на них возникают лишь при конечной скорости деформирования твердого тела и со временем самопроизвольно релаксируют. Как показано в работах [6, 7], в начальные моменты времени напряжения на неоднородностях нарастают по линейному закону, в дальнейшем рост замедляется, и на неоднородности каждого размера устанавливается свое напряжение. Чем больше размер неоднородности, тем выше напряжение на ней при заданной скорости деформации, и тем меньше скорость релаксационных процессов. Если тело бесконечно велико (в нашем случае — это участок литосферы, вмещающий месторождение), то размер неоднородности L_0 , на которой концентрируется напряжение σ , равное предельному для данной прочности и плотности ρ пород, составит:

$$L_0 = \frac{\sigma v}{\rho c^2 \varepsilon},$$

где ε — скорость деформации; v — константа, отражающая скорость релаксации напряжений; c — скорость звука.

Для тел, размеры которых соизмеримы с L_0 , деформация с постоянной скоростью будет происходить без разрушения материала, а возникающие при деформировании напряжения из-за релаксации не смогут вырасти до предельной величины. В процессе реализации общих подходов к проблеме выполнен комплекс теоретических исследований, который показал, что при формировании в горном массиве достаточно крупной неоднородности (например, отрабатываемого участка рудного тела) условия воспроизводства устойчивых динамических структур в литосфере будут определяться исключительно релаксационными процессами на внешнем контуре этих неоднородностей. Поэтому опережающее формирование такого контура открывает реальную возможность выделения зоны техногенного разрушения литосферы из общего поля изменений геофизического состояния массива за счет разделения во времени процессов добычи полезного ископаемого и процессов преодоления последствий геомеханического возмущения прилегающих участков литосферы. В результате обеспечивается кардинальное улучшение геомеханических условий отработки основных запасов выемочного участка. Это положение составляет содержание геофизической идеи построения конвергентных горных геотехнологий.

В свою очередь, опережающее возведение каркасной объемной конструкции из ограждающих и разделительных искусственных массивов делает выбор технологии очистной выемки независимым от развития поля изменений геофизического состояния массива. Поэтому технологическая идея работы заключается в том, что принципиально новые возможности повышения эффективности и безопасности достигаются путем целенаправленной компоновки во времени и пространстве известных горных технологий с различными характеристиками. Тогда общая кластерная система конвергентной горной технологии разработки месторождения будет функционировать за счет последовательно-параллельного взаимодействия трех основных технологических кластеров:

- опережающее возведение несущей “каркасной” конструкции в виде оконтуривающего, разделительного и искусственных массивов из закладочных материалов необходимого качества;
- отработка основных запасов месторождения (участка) с применением геотехнологий, отвечающих геологическим особенностям вынимаемых участков;
- реабилитация выработанного пространства в пределах отрабатываемого участка или месторождения.

Выполненный комплекс теоретических исследований реакции разрабатываемого горного массива на перераспределение нагрузок в результате создания объемной “каркасной” конструкции показал, что вследствие выделения очистных блоков из общего поля напряжений в них снижается интенсивность развития микротрещиноватости. Поэтому в результате общей релаксации напряжений после завершения работ по созданию “каркасной” конструкции структура

полей развития микротрещиноватости практически полностью идентична картине влияния порового давления во флюидонесущих породах на величину действующих напряжений [8]. Это влияние на разных участках обрабатываемого массива показано на диаграммах Мора. При увеличении влияющего фактора значение действующего напряжения уменьшается, а в диаграмме Мора круг этого напряжения смещается в сторону начала координат, что означает переход массива горных пород в неустойчивое состояние.

Сравнивая качество породного массива по системе Бартона вне “каркаса” и внутри него, нетрудно заметить, что во внутреннем объеме значение индекса Q возрастает внутри каркаса за счет минимизации процессов вымывания вторичных минералов из трещин (уменьшается значение коэффициента I_a , характеризующего измененность стенок трещин), а также влияния воды на устойчивость массива (увеличивается значение коэффициента I_w , характеризующего присутствие воды в трещинах) [9]. Категория нарушенности (устойчивости) массива при этом возрастает, а при некоторых сценариях качества скального массива существует вероятность отказа от использования крепи при поддержании горных выработок внутри каркаса в период их эксплуатации.

Конструктивные особенности конвергентной горной технологии. После проведения на уровне верхнего и нижнего горизонтов этажных подготовительных выработок вдоль внешнего контура обрабатываемого участка рудного тела проходят нижняя и верхняя замкнутые контурные нарезные выработки оконтуривающего искусственного массива (рис. 1), затем — нижние и верхние нарезные выработки каждого из намеченных разделительных искусственных массивов. Из верхних выработок нарезных и контурных возводят защитный слой, нижняя поверхность которого находится на уровне кровли нарезных и контурных выработок. Из нижних нарезных выработок начинают возведение снизу-вверх оконтуривающего и разделительных искусственных массивов, применяя технологию горизонтальных слоев с твердеющей закладкой или другие известные геотехнологии, например, этажную или подэтажную отбойку скважинами из вертикальных или горизонтальных выработок, шпуровую отбойку, выбуривание, слоевую выемку с применением комбайнов и т. д.

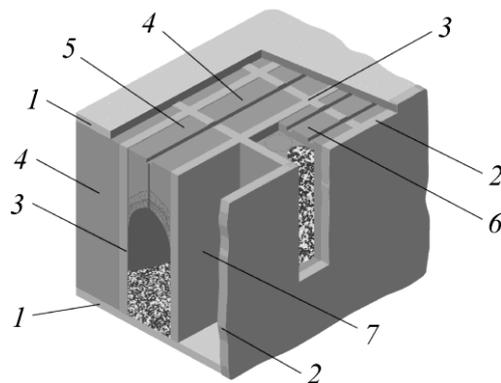


Рис. 1. Принципиальная схема “каркасной” горной технологии; искусственные массивы: 1 — ограждающие горизонтальные; 2 — ограждающие вертикальные; 3 — разделительные; очистные блоки: 4 — подготовленные, 5 — обрабатываемые взрывогравитационной геотехнологией и 6 — взрывомеханической; 7 — отработанные

Для выдачи руды и вентиляционных работ вдоль внутреннего контура оконтуривающего искусственного массива проходят восстающие, которые затем частично выкрепляются при проведении закладочных работ. При этом, в зависимости от формы внешнего контура обрабатываемого участка рудного тела, толщина возводимого оконтуривающего искусственного массива может изменяться за счет отработки локальных неровностей внешнего рудного контура. Подготовка каждой выемочной единицы включает в себя также формирование днища одной из известных конструкций и проведение нижней подсечки [10].

Разделение обрабатываемого участка на выемочные единицы, положение которых в пространстве, а также размеры и форма фиксированы при создании системы искусственных массивов различного назначения, позволяет реализовать определенные в работе [10] принципы создания природоподобных технологий для каждой выемочной единицы.

Следует отметить, что опережающее возведение искусственных массивов позволяет резко повысить объем достоверности геологической информации о горнотехнических условиях очистной выемки каждой выемочной единицы, а также о качестве руды и о характере распределения полезного компонента. Поэтому третья стадия обработки участка месторождения заключается в последовательной или параллельной обработке запасов выемочных единиц с применением известных геотехнологий. При этом порядок обработки принимается по условиям устойчивости разделительных искусственных массивов таким, чтобы диагонали двух и более одновременно обрабатываемых выемочных единиц (в горизонтальном сечении) всегда составляли бы прямую линию фронта перемещения очистных работ в обработанном участке.

По мере продвижения фронта очистных работ пространство обработанных выемочных блоков заполняют твердеющими или сухими закладочными смесями, твердыми отходами горного производства, хвостами обогащения, металлургическими шлаками или просто бытовыми твердыми отходами (рис. 2). Видно, что только при таком порядке выемки очистных блоков и реабилитации их выработанного пространства ни один элемент “каркасной” конструкции не обнажается с двух сторон, а всегда воспринимает внешние нагрузки совместно с искусственным или естественным массивом смежных очистных блоков. Поэтому такая схема обработки участка месторождения обеспечивает максимальную устойчивость всей системы в целом.

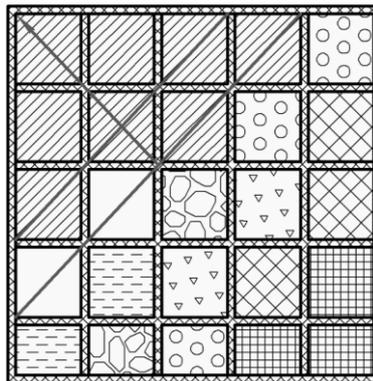


Рис. 2. Диагональный порядок обработки выемочных блоков

Применение этого нового класса геотехнологий позволит практически полностью исключить конструкционные потери руды, а также, в сочетании со специальными способами возведения закладочных массивов без усадки материала, надежно обеспечить сохранность налегающей толщи пород, особенно при наличии в ней флюидонесущих горизонтов. Однако основным перспективным преимуществом такой структуры технологического кластера добычных работ является легко реализуемая возможность возврата к массовому использованию на новом уровне знаний энергии гравитационного поля Земли для отбойки руды в очистных камерах. Обоснование такой перспективы в варианте управляемой взрыво-гравитационной отбойки с опережающим разрушением замка свода равновесия выполнено в работе [10].

Методика моделирования. Численное моделирование проектируемой каркасной горнотехнической системы проводилось методом граничных интегральных уравнений с использованием программного комплекса Mar3D. Исходное напряженное состояние выбрано литостатическое, которое для рассматриваемого случая равно примерно 14.5 МПа на проектируемой глубине 500 м. Принятая модель каркасной горнотехнической системы включает крупную неоднородность, а именно обрабатываемый участок в мощном рудном теле (рис. 3).

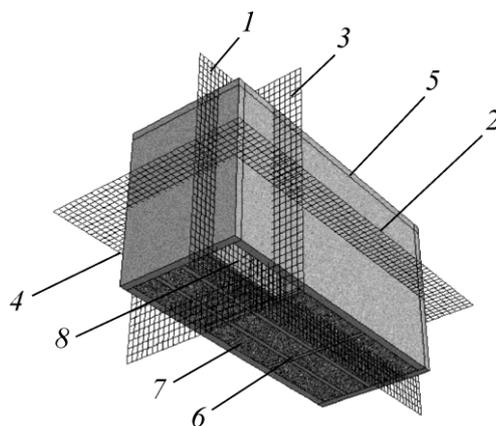


Рис. 3. Модель проектируемой каркасной горно-технической системы высотой 100 м, которая состоит из двенадцати камер длиной 55 м и шириной 15 м: 1–3 — расчетные сетки численной модели; 4 — вертикальный оконтуривающий массив; 5 — горизонтальный оконтуривающий массив; 6 — разделительные искусственные массивы; 7 — очистной блок с запасами руды; 8 — обрабатываемый блок

В табл. 1 представлены сценарии моделирования и объемы элементов выемочного участка: $B_{кар}$ и $B_{пер}$ — толщина ограждающих и разделительных искусственных массивов; $V_{кар}$ и $V_{пер}$ — объемы ограждающих и разделительных искусственных массивов; $V_{кам}$ — объем очистной выемки; $V_{общ}$ — общий объем участка (кар — каркас; пер — переборки, кам — камера, общ — общий объем очистного участка).

ТАБЛИЦА 1. Сценарии и объемы проектируемой каркасной горно-технической системы

п/п	Сценарий	$V_{кар}, \text{м}^3$	$V_{кам}, \text{м}^3$	$V_{пер}, \text{м}^3$	$V_{общ}, \text{м}^3$	$V_{кар+пер}, \text{м}^3$	$V_{кар+пер}/V_{общ}, \%$	$V_{кар+пер}/V_{кам}, \%$
1	$B_{кар} = 5 \text{ м}, B_{пер} = 3 \text{ м}$	323587.5	999000	191250	1513837.5	514837.5	34.01	51.54
2	$B_{кар} = 4 \text{ м}, B_{пер} = 2 \text{ м}$	261645		126300	1386945	387945	27.97	38.83
3	$B_{кар} = 4 \text{ м}, B_{пер} = 4 \text{ м}$	276600		257400	1533000	534000	34.83	53.45
4	$B_{кар} = 6 \text{ м}, B_{пер} = 3 \text{ м}$	378922.5		191250	1569172.5	570172.5	36.34	57.07

Физико-механические свойства рудного массива, а также закладочного массива каркаса и камер представлены в табл. 2. Прочность рудного массива вне и внутри каркаса определена по обобщенному критерию Хука-Брауна с использованием программы RocData.

ТАБЛИЦА 2. Физико-механические свойства рудного и закладочного массива

Наименование	$\sigma_{сж}, \text{МПа}$	Модуль упругости $E, \text{МПа}$	Коэффициент Пуассона ν	Сцепление $C, \text{МПа}$	Угол трения $\varphi, \text{град}$
Рудный массив вне каркаса (флюидонесущие горизонты)	50	27000	0.25	7.70	40.97
Рудный массив внутри каркаса (сухой массив)	70	29500	0.25	13.07	41.55
Закладочный массив каркаса и переборок	5	2800	0.28	1.214	35
Закладка камер	0.5	50	0.3	0.112	—

Анализ результатов моделирования. Для расчетов и анализа использовались программа Mar3D, встроенный САПР для построения сложных трехмерных моделей, анализ и визуализация горного давления и упругих деформаций на контуре каркаса и очистных блоков при различных критериях нарушенности рудного массива. Результаты моделирования позволили определить минимальный коэффициент запаса прочности элементов каркасной горной конструкции в

процессе поэтапной отработки запасов, максимальные и минимальные напряжения, которые возникают в массиве вне и внутри каркаса, а также зоны растягивающих деформаций, имеющие критические значения. Для оценки степени нарушенности рудного массива в результате действия избыточного напряжения при упругом анализе использовался критерий прочности Хука–Брауна, который является функцией максимального и минимального главных напряжений, а также прочностных свойств рудного массива.

В качестве критерия нарушенности массива и каркаса применяется коэффициент запаса прочности КЗП (SFA — английская версия аббревиатуры КЗП, программная), определяемый следующим образом:

$$SFA = \frac{\text{Прочность}}{\text{Давление}} = \frac{\sigma_c + q\sigma_3}{\sigma_1},$$

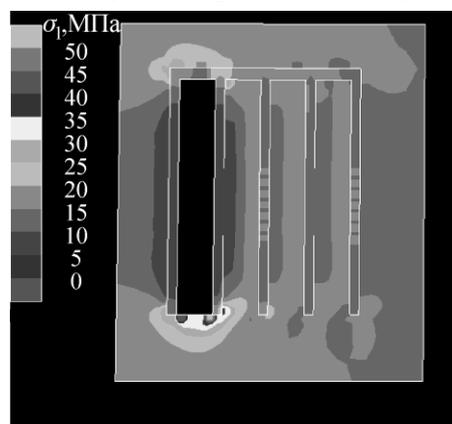
где σ_c — предел прочности руды на одноосное сжатие в массиве, МПа; σ_1, σ_3 — главное максимальное и минимальное напряжение соответственно, МПа;

$$q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi},$$

где φ — угол внутреннего трения руды в массиве, град.

При выполнении численного моделирования напряженно-деформированного состояния проектируемой каркасной горнотехнической системы по четырем сценариям получены следующие результаты (рис. 4):

- допустимый коэффициент запаса прочности каркасной системы при условии высокой степени достоверности исходных входных параметров определен по аналогии с камерными системами КЗП ≥ 1.5 ;
- рассчитан минимальный коэффициент запаса прочности системы КЗП > 1.65 с учетом всех этапов отработки участка;
- максимальное главное напряжение σ_1 внутри каркасной системы в рудном массиве камер изменяется от 10 до 25 МПа, во вмещающем каркасную систему массиве — от 5 до 80 МПа и более (рис. 4). Установлено, что отработанные и заложенные камеры находятся в разгруженном состоянии, зоны максимальных напряжений формируются в районе обрабатываемой камеры, в близлежащих к ней искусственных массивах и неотработанных камер;
- минимальное главное напряжение σ_3 в бортах камер изменяется в диапазоне от -2 до 20 МПа и свидетельствует о том, что релаксации (возможные расслоения массива в бортах камер) могут происходить, но лишь в случае длительного их стояния незаложенными;
- установлено, что наиболее благоприятная геомеханическая ситуация наблюдается для условий отработки по третьему сценарию, когда толщина всех элементов “каркасной” конструкции одинаковая, для рассматриваемого случая — 4 м.



Сценарий 3;
Шаг № 2;
по вертикальной сетке № 3;
0–50 МПа — действующие
напряжения

Рис. 4. Распределение максимального главного напряжения σ_1 в модели проектируемой каркасной горно-технической системы и во вмещающем его массиве

На основе полученных при моделировании в программном комплексе Mar3D значений действующих главных максимальных σ_1 и минимальных σ_3 напряжений и прочности рудного массива внутри каркаса установлено, что значения действующих напряжений не превышают предела прочности массива (кривая 1) и не приводят к его разрушению на всех этапах отработки, так как установленные значения действующих напряжений (кривая 2) находятся ниже кривой 1 (рис. 5). Установлено также, что значения действующих напряжений (кривая 2) находятся выше линии Можи (линия 3) и характеризуют рудный массив как упругий.

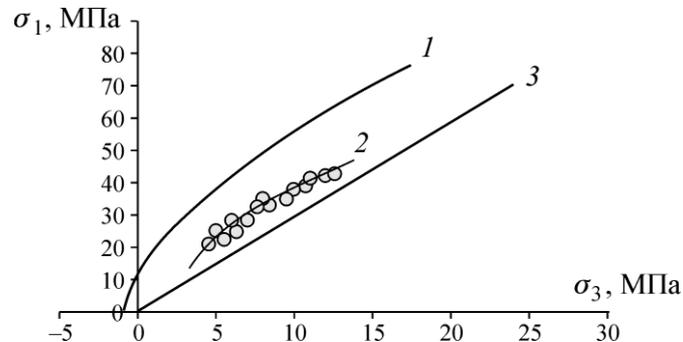


Рис. 5. График распределения действующих главных максимальных σ_1 и минимальных σ_3 напряжений (кривая 2) в рудном массиве внутри каркаса, прочность массива (кривая 1) и линия Можи (линия 3)

Предлагаемый подход рекомендуется использовать для геотехнической оценки состояния массива горных пород в условиях работы каркасной технологии с применением внутри каркаса систем разработки различного класса — с естественным и искусственным поддержанием очистного пространства, а также систем с обрушением руды. В сложных горно-геологических условиях рудного массива вне каркаса, в условиях повышенного горного давления, обильного притока воды, повышенной трещиноватости пород модель калибруется с учетом проведения геотехнической оценки состояния массива и уточняется с использованием программ Dips и RocData.

ВЫВОДЫ

Для разработки рудных месторождений подземным способом предложена конвергентная горная технология на основе принципа отработки рудных тел по каркасной схеме. При исследовании напряженно-деформированного состояния проектируемой каркасной горнотехнической системы установлено, что допустимый коэффициент запаса прочности системы не превышает предельных значений. Максимальное главное напряжение внутри каркасной системы в рудном массиве камер на 70–85 % ниже, чем во вмещающем ее массиве. Определено, что отработанные и заложенные камеры находятся в разгруженном состоянии, зоны максимальных напряжений формируются в районе обрабатываемой камеры, в близлежащих к ней искусственных массивах и неотработанных камерах. Наиболее благоприятная геомеханическая ситуация обеспечивается когда толщина всех элементов “каркасной” конструкции одинаковая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Viktorov S. D., Iofis M. A., and Goncharov S. A.** Movement and Failure of Rocks, Moscow, Nauka, 2005, 217 pp. (in Russian) [Викторов С. Д., Иофис М. А., Гончаров С. А. Сдвигение и разрушение горных пород. — М.: Наука, 2005. — 217 с.]
2. **Kurlenya M. V., Seryakov V. M., and Eremenko A. A.** Induced Geomechanical Stress Fields, Novosibirsk, Nauka, 2005, 264 pp. (in Russian) [Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.]

3. **Kovalchuk M. V., Naraikin O. S., and Yatsishina E. B.** Convergence of sciences and technologies – a new stage of scientific-and-technological advance, *Vopr. Philosophy* 2013, no. 3, pp. 3–11 [**Ковальчук М. В., Нарайкин О. С., Яцишина Е. Б.** Конвергенция наук и технологий – новый этап научно-технического развития // *Вопросы философии*. — 2013. — № 3. — С. 3–11.]
4. **Trubetskoy K. N., Myaskov A. V., Galchenko Yu. P., and Eremenko V. A.** Creation and justification of convergent technologies for underground mining of thick solid mineral deposits, *Mining Journal*, 2019, no. 5, pp. 6–143 [**Трубецкой К. Н., Мясков А. В., Галченко Ю. П., Еременко В. А.** Обоснование и создание конвергентных горных технологий подземной разработки мощных месторождений твердых полезных ископаемых // *Горн. журнал*. — 2019. — № 5. — С. 6–13.]
5. **Trubetskoy K. N., Galchenko J. P., and Sabyanin G. V.** Concept of subsurface development of bowels of earth on the basis of “framework” geotechnology, 21st World Mining Congress, Session 15, Krakow, 2008, pp. 309–317.
6. **Rodionov V. N., Sizov I. A., and Tsvetkov V. M.** Elements of geomechanics, Moscow, Nedra, 1986, 297 pp. (in Russian) [**Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М.** Основы геомеханики. — М.: Недра, 1986. — 297 с.]
7. **Rodionov V. N.** An Essay on geomechanics, Moscow, Nauchnyi mir, 1996, 64 pp. (in Russian) [**Родионов В. Н.** Очерки геомеханики. — М.: Научный мир, 1996. — 64 с.]
8. **Terzaghi K.** Theoretical Soil Mechanics, John Wiley&Sons, 1943.
9. **Khazhyylay Ch. V., Eremenko V. A., Kosyreva M. A., and Yanbekov A. M.** Effect of pore pressure on stresses and strains in rock mass under mining with convergent technologies. *Miner’s Progeny–2019: Proc. All-Russia Conf. for Students, Post-Graduates and Young Scientists with Elements of School*, Novosibirsk, IGD SO RAN, 2019 (in Russian) [**Хажыылай Ч. В., Еременко В. А., Косырева М. А., Янбеков А. М.** Влияние порового давления на напряженно-деформированное состояние массива горных пород в условиях применения конвергентных горных технологий // *Горняцкая смена-2019: труды Всерос. науч. конф. для студентов, аспирантов и молодых ученых*. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2019.]
10. **Trubetskoy K. N. and Galchenko Yu. P.** Subsoil management geoeology and eco-geotechnology, Moscow, Naughtekhlitizdat, 2015, 360 pp. (in Russian) [**Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П.** Геоэкология освоения недр и экогеотехнологии разработки месторождений. — М.: Научтехлитиздат, 2015. — 360 с.]