

О МОДЕЛИРОВАНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Наталья Анатольевна Немова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, д.54, , к.т.н., старший научный сотрудник, тел. 89628426717, e-mail: nemova-nataly@mail.ru

Александр Владиславович Резник

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, д.54, , к.т.н., научный сотрудник, тел. 89231145306, e-mail: a-reznik@mail.ru

Владимир Николаевич Карпов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, д.54, , к.т.н., старший научный сотрудник, тел. 89538784334, e-mail: karpov@misd.ru

Комплексная цифровизация добывающего предприятия способна обеспечить положительный эффект от оптимизации взаимосвязей между элементами горнотехнической системы. Цифровизация предполагает переход от фрагментарной автоматизации отдельных стадий или процессов к полностью автоматизированному производству, управляемому в режиме реального времени интеллектуальными системами. 3D модели, включающие геолого-структурный анализ и геодинамическое моделирование геологических структур месторождения, целесообразно использовать для более точного и объективного представления о состоянии массива горных пород и его изменении во времени. Создание интегрированной геомеханической модели месторождения, включающей геологическую модель, модели породного массива и свойств пород, структурную, гидрогеологическую и другие позволяет осуществлять текущий мониторинг и перспективный прогноз напряженно-деформированного состояния геосреды горных предприятий.

Ключевые слова: цифровизация, 3D модели, геологическая модель, структурная модель, напряженно-деформированного состояния

MODELING OF GEOMECHANICAL PROCESSES IN THE FIELDS IN THE CONDITIONS OF DIGITAL TRANSFORMATION OF MINING ENTERPRISES

Natalya A. Nemova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasny pr. 54, Novosibirsk, 630091, Russia, candidate of Technical Sciences, senior researcher ,phone: 89628426717, e-mail: nemova-nataly@mail.ru

Aleksander V. Reznik

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasny pr. 54, Novosibirsk, 630091, Russia, candidate of Technical Sciences, research associate, phone: 89231145306, e-mail: a-reznik@mail.ru

Vladimir N. Karpov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasny pr. 54, Novosibirsk, 630091, Russia, candidate of Technical Sciences, senior researcher, phone: 89538784334, e-mail: karpov@misd.ru

The integrated digitalization of the mining enterprise can provide a positive effect from the optimization of the relationships between the elements of the mining system. Digitalization involves the transition from fragmentary automation of individual stages or processes to fully automated production, controlled in real time by intelligent systems. 3D models, including geological and structural analysis and geodynamic modeling of the geological structures of the deposit, should be used for a more accurate and objective view of the state of the rock mass and its changes over time. The creation of an integrated geomechanical model of the field, including a geological model, models of rock mass and rock properties, structural, hydrogeological, and others, allows for current monitoring and long-term forecast of the stress-strain state of the geomedium of mining enterprises.

Keywords: digitalization, 3D models, geological model, structural model, stress-strain state

Введение

В настоящее время практически во всех отраслях экономики наблюдается динамичный рост объемов генерируемой и перерабатываемой информации с одновременным совершенствованием и развитием технологий управления ею. Горнодобывающие предприятия вынуждены адаптироваться к новым условиям, изыскивать резервы для повышения эффективности работы с большими объемами данных. Существует множество направлений использования цифровых технологий, однако, максимального эффекта можно достичь только в случае комплексного внедрения информационных систем, то есть полной цифровой трансформации компании.

Именно полномасштабная цифровизация горнодобывающего предприятия способна обеспечить синергетический эффект не столько за счет минимального повышения эффективности отдельных элементов горнотехнической системы, сколько за счет обеспечения оптимизированной взаимосвязи между ними [1,2]. Горнодобывающие компании активно включились в процессы цифровой трансформации российской экономики, они внедряют самые передовые технологии для повышения производительности, снижения издержек, повышения качества продукции, интеграции цепочек поставок.

Основной принцип цифровизации промышленности — так называемой Индустрии 4.0. — переход от фрагментарной автоматизации отдельных стадий или процессов к полностью автоматизированному цифровому производству, управляемому интеллектуальными системами в режиме реального времени. Создание умных месторождений позволяет управлять добычей и вести её непрерывную оптимизацию. Принцип работы умных месторождений заключается в объединении технологий измерения, контроля и управления в реальном времени, формировании непрерывного информационного потока, позволяющего оперативно реагировать на ситуацию и принимать оптимальные решения. Основные компоненты концепции «Индустрия 4.0» включают: 1) цифровизацию, вертикальную и горизонтальную интеграцию в цепочках поставок; 2) цифровое моделирование бизнес-процессов; 3) цифровизация продуктов и услуг [1, 3-8].

Для более полного понимания состояния рассматриваемого вопроса проанализируем реализуемые в науке и практике аспекты моделирования геомеханических процессов на карьерах и разрезах при их цифровой трансформации.

Разработка геомеханических моделей месторождения является фундаментальной основой всех проектируемых конструкций. Они состоят из нескольких компонентов (геологическая модель, структурная модель, модель породного массива (свойства пород), гидрогеологическая модель), позволяющих на горном предприятии: осуществлять текущий и перспективный прогноз напряженно-деформированного состояния (НДС) с учетом изменения геометрических и механических параметров во времени и в пространстве; визуализировать 3D модели совместно с расчетными данными о поле напряжений и деформаций и материала геомеханического мониторинга; проводить комплексный анализ информации для обоснования геомеханической безопасности планируемых горных работ [9-10].

Цель исследования — улучшение качества решения горно-геометрических задач при освоении и эксплуатации сложных по строению месторождений за счет внесения изменений поступающей горно-геологической информации в геомодели и осуществления оперативного доступа к средствам редактирования геометрии месторождения в режиме реального времени.

Методы и материалы, предмет и объект исследования

Использованные при проведении исследования методы для решения поставленной цели: комплексный сравнительный и структурный анализ литературы, метод пообъектного и выборочного исследования, изучение фактических материалов, содержащихся в монографических и периодических изданиях, проектные и отчетные данные предприятий, методы количественной и качественной обработки данных, обобщение опыта использования современного программного обеспечения.

Объектом исследования являются сложные по строению горного массива месторождения, а их цифровые модели являются предметом исследования.

Результаты

Цифровизация месторождения, которая связана с созданием его 3D моделей, включающих геолого-структурный анализ и геодинамическое моделирование геологических структур залежи, необходима для объективного представления о состоянии горного массива. 3D модель представляет собой набор моделей горно-геологических и горно-технологических объектов, несущих информацию об их геометрии, физико-механических и технологических свойствах, напряженном состоянии массива. Работа с моделями осуществляется средствами геоинформационной системы, реализующей инструменты хранения и обработки пространственно-распределенной информации, ее визуализации в удобном для анализа виде. [9]

В геологической 3D модели графическими средствами описывается характер распределения типов пород и полезного ископаемого (рис. 1).

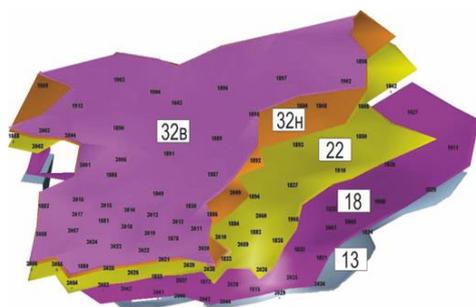


Рис. 1. Трехмерная геологическая модель пластов на угольном месторождении в Якутии [11]

Категории типов пород бывают связаны не только литологическим составом, но также со степенью и видом изменений, которые могут значительно трансформировать свойства пород. При изменении высоты откоса борта карьера необходимо учитывать влияние естественных напряжений, особенно действующих в сочетании с высокими напряжениями, создаваемыми в подошве карьера (разреза). Оценка природных напряжений в породах при естественном залегании должна быть включена в геологическую модель.

Структурная модель разрабатывается на двух уровнях: главные структуры (складки, разломы в масштабе между транспортными съездами и карьера в целом); структурное строение, определяемое трещиноватостью массива (трещины, разломы в масштабах уступов). Главные разломы будут непрерывными, как по простиранию, так и по падению, несмотря на то, что они могут относительно далеко располагаться друг от друга. Таким образом, предполагается, что они будут оказывать влияние на проектную конструкцию откоса между съездами или в пределах всего борта. С другой стороны, структурное строение обычно имеет ограниченную протяженность с близким расположением элементов и, таким образом, становится основным фактором, который необходимо учитывать при проектировании в пределах уступа и, возможно, для группы уступов между съездами. (рис. 2)

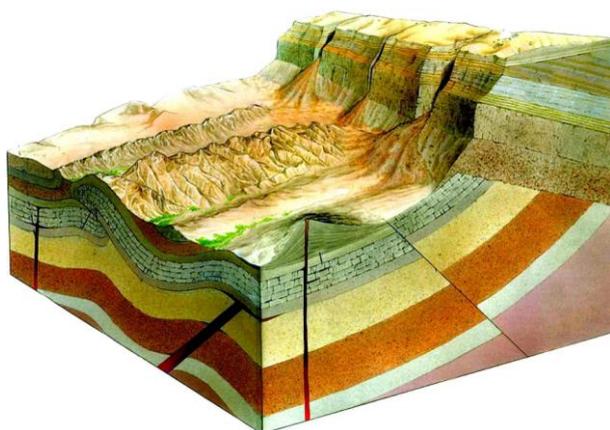


Рис. 2. Структурная модель месторождения [12]

В моделях породного массива представлены свойства пород, которые определяют возможные рабочие характеристики формируемого откоса борта карьера и его днища. В крепких породах структура массива (однородность и неоднородность среды), определяемая в том числе его трещиноватостью, будет контролирующим фактором, даже при относительно высоких откосах. В более неустойчивых породах и при очень высоких откосах, важную роль будет играть прочность породного массива сама по себе или в сочетании со структурами (рис. 3.)

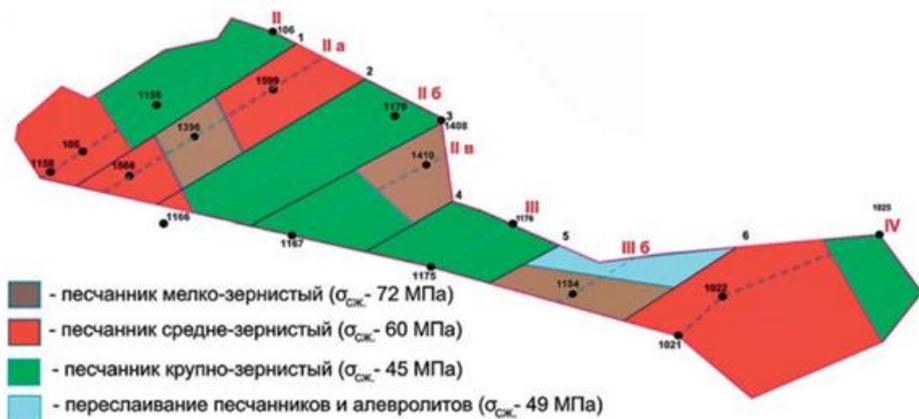


Рис.3. Модель породного массива Эльгинского каменноугольного месторождения по горизонтальному разрезу по почве пласта Н₁₆[12]

В гидрогеологической модели описываются данные о давлении подземных вод, поверхностные и подземные водопритоки, определяющие гидрогеологический режим ведения горных работ, которые могут оказать значительное отрицательное воздействие на устойчивость откоса борта карьера и безопасность его эксплуатации (рис.4). С учётом специфики обрабатываемых месторождений могут создаваться и использоваться и другие виды моделей, например, криологические, газо- и нефтеносности, сейсмические и другие.

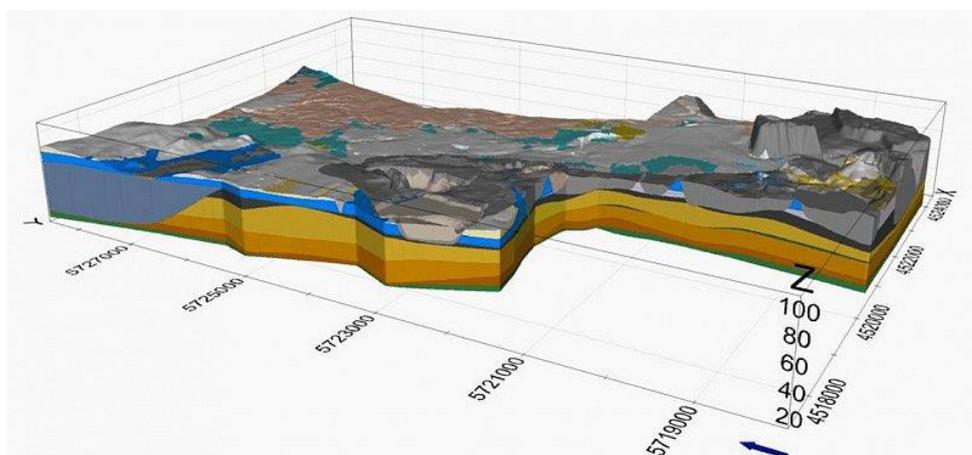


Рис. 4. Гидрогеологическая модель массива [13]

Горнотехническая обстановка на месторождении вследствие непрерывного развития и ведения горных работ постоянно претерпевает как геолого-геомеханические, так и конструктивные изменения. Формирование техногенных участков в массиве пород оказывает влияние на деформационные процессы, характер распределения действующих напряжений в угле-или рудопородном массиве, а также на физико-механические свойства горных пород, их блочность, трещиноватость, нарушенность и устойчивость в целом.

Создание геомеханической модели для действующего или осваиваемого месторождения позволяет на качественно новом уровне решать вопросы оперативного выбора способа безопасного управления состоянием массива пород на стадии строительства и эксплуатации карьера (разреза).

Геомеханические модели по совокупным признакам представляют собой физико-механические системы массива горных пород. Состоит из структурной модели массива различных горных пород с соответствующими прочностными характеристиками, являющимися элементами этой модели (рис.5). При этом структурная модель отражает природные и техногенные условия залегания массива горных пород, характеризующие объект: строение всей толщи пород, условия залегания отдельных слоев, тектонические нарушения, конструктивные особенности борта, наличие внешней нагрузки [14, 15].

Для изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) природного массива горных пород необходимо иметь подробную и качественную фактическую характеристику геологического строения исследуемого объекта с описанием наличия тектонических нарушений, условий залегания пород, их трещиноватости, обводненности и проницаемости пород, типа движения подземных вод, а также иметь сведения о физико-механических свойствах пород. В зависимости от горно-геологических условий разработки месторождений выбирается геомеханическая модель, а после тщательного горно-геометрического анализа – расчетная схема, по которой производится расчет параметров предельного откоса или откоса с заданным коэффициентом запаса устойчивости, включающая сведения о его внешних и внутренних границах, данные по деформационным и прочностным свойствам горных пород, слагающих изучаемый массив. [14, 16-17]

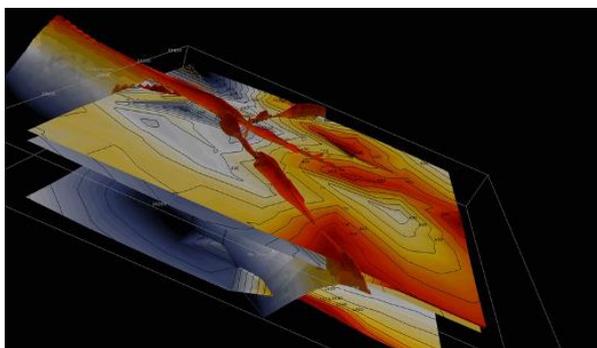


Рис. 5. Геомеханические модели рудных месторождений [18-19]

Наиболее широкое распространение получила механическая модель, основанная на достижении одновременного предельного равновесия для всей поверхности скольжения, с учетом физико-механических свойств пород, полученных как лабораторным путем, так и натурными испытаниями. [14]

Обсуждение

Функции каждой из рассмотренных моделей, возможности их взаимного влияния и дополнения, интеграции на единой цифровой платформе, заключаются в следующем:

– в геологической модели подсчет и картирование запасов, планирование и проектирование геологоразведочной сети, оценка неопределенностей и рисков, система элементов геологического строения, описывающая состав, структуру, размеры, форму исследуемого геологического объекта, подготовка основы для гидродинамического и геомеханического моделирования;

– в структурной модели визуализация и прогнозирование форм залегания горных пород и форм их дислокаций, в виде слоев, трещин, дизъюнктивов, блоков, складок;

– в гидрогеологической модели визуализация данных: о давлении подземных вод; форм, размеров взаимного расположения в выделенном гидrolитосферном пространстве водоносных, относительно водоупорных слоев и пластов или пространственное соотношение разной степени трещиноватости и водоносности локальных и региональных разломов и зон;

– в геомеханической модели, основанной на детальной структурной модели; оптимизация схем вскрытия залежи, процесса буровзрывных работ; определение механических свойств горных пород; анализ напряженно-деформированного состояния горного массива; управление состоянием горного массива; определение устойчивости откосов бортов и уступов; оценка зон напряжений; моделирование зон напряжений.

В настоящее время существует большое множество программных комплексов, основанных на аналитических и численных методах математического моделирования. Они разработаны для решения инженерно-геологических задач по изучению напряженно-деформированного состояния однородных и неоднородных природных массивов горных пород с неровными внешними и внутренними границами, подверженных действию разнообразных внешних сил и влиянию техногенного воздействия, в том числе на методах конечных элементов [17-27].

Комплексная цифровая трансформация месторождений и базирующихся на их запасах горнодобывающих предприятий является объективной необходимостью и реальностью, несмотря на достаточно длительный путь по её эффективному внедрению. Современный цифровой этап развития – это совместное развитие геотехнологий и их элементов с технологиями и средствами телекоммуникаций, высокоточной навигации, вычислительных технологий и робототехники. Самый сложный этап перехода на «цифру» – это перестройка всех процессов

организации, развитие компетенций персонала и создание доверия новым интеллектуальным производствам.

Заключение

Создание максимально точных геомеханических моделей на базе геологических данных для действующего или создаваемого предприятия позволяет на качественно более высоком уровне в режиме реального времени оценивать влияние природных и техногенных факторов на геомеханическое состояние прибортового массива горных пород и решать вопросы оперативного выбора способа управления им.

На основе проведенного анализа показано, что при освоении сложных по строению и неоднородных по свойствам горных пород месторождений необходимо комплексирование моделей, которые описывают различные аспекты состояния горного массива. По мере повышения уровня знаний о геологической структуре и процессах, происходящих в горном массиве, они могут и должны наполняться другими типами моделей. Должны учитываться и изменения, связанные с появлением новой горно-геологической информации по мере отработки залежей, для корректировки и актуализации созданных моделей месторождений с целью совершенствования технологий их отработки. Изменчивость входящих горно-геологических параметров при переходе на другой участок отработки месторождения может кардинально изменить параметры применяемой технологии.

Освоение более сложных по строению месторождений в новых регионах с экстремальными природно-климатическими и горно-геологическими условиями предполагает постановку и решения новых научно-практических исследовательских задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лютягин Д. В., Яшин В. П., Забайкин Ю. В., Якунин М. А. Особенности и тенденции цифровой трансформации российской горнодобывающей отрасли // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2019. – Том 9, № 7А. – С. 147-159.
2. Рыльников А. Г. Пыталев И. А. Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли: технические решения и технологические вызовы // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2020. – вып.1. – С. 470-481.
3. Власюк Л.И., Сиземов Д.Н., Дмитриева О.В. Стратегические приоритеты цифровой трансформации угольной отрасли Кузбасса. Экономика в промышленности. – 2020. – 13(3):328-338. – С.328–338.
4. Лукичев С. В., Наговицын О. В. Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности: прошлое, настоящее, будущее // Горный журнал. – 2020. – №9 – С.13–18. DOI 10.17580/gzh.2020.09.01
5. Рогожин А. В., Курцев Б. В. Цифровая трансформация горнодобывающего предприятия: направления развития // URL: <https://www.vnedra.ru/novosti/czifrovaya-transformacziya-gornodobyvayushhego-predpriyatiya-napravleniya-razvitiya-8799/> Дата обращения 29.01.2021г.
6. Чехлар М., Жиронкин С.А., Жиронкина О.В. Цифровые технологии Индустрии 4.0 в Майнинге 4.0 – перспективы развития геотехнологии в XXI веке // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – № 3. – С. 80-90.

7. Квачев В.Н., Леонтьева Е.В., Хаустов В.В., Козуб А.В., Кушнерчук В.В. Основные направления цифровизации гидрогеологических процессов на Михайловском ГОКе им. А.В. Варичева // Горная промышленность. – 2020. – №3. – С.91-97.
8. Козырев А.А., Лукичев С.В., Наговицын О.В., Семенова И.Э. Геомеханическое и горно-технологическое моделирование как средство повышения безопасности отработки месторождений твердых полезных ископаемых // ГИАБ. – 2015. – С. 73–83.
9. Конурин А.И., Неверов С.А., Неверов А.А., Щукин С.А. К проблеме численного моделирования напряженно-деформированного состояния и устойчивости трещиноватого массива // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т.6, №2. – С.144-150.
10. Руководство по проектированию бортов карьера, под редакцией: Джон Рид, Питер Стейси. Пер.санл. – Екатеринбург: Правовед, 2015. – 544с.
11. Khoiutanov E.A. and Gavrilov V.L. Modeling coal deposits in hard-to-reach regions of Yakutia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science262(2019) 012026. DOI:10.1088/1755-1315/262/1/012026
12. Хосоев Д.В. Оценка горнотехнических условий Эльгинского месторождения с позиции применения горных комбайнов // Горная промышленность. – 2016. – №6 (130). – С.81-83.
13. https://geobur.net/news/zagholovok_stat_i01
14. Волков М.Н., Половов Б.Д., Прищепа Д.В. Компьютерные технологии комплексного моделирования геомеханических ситуаций // «Известия вузов. Горный журнал». – 2020. – № 4. – С. 40-53.
15. Абдылдаев К.К., Кожогоулов К.Ч. Курманбекулуу Т. Геомеханическая модель неоднородных прибортовых массивов сложноструктурных месторождений // Горная промышленность. – 2016. – №6(130). – С. 86-87.
16. Дмитриев С.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с учетом неоднородностей // Проблемы недропользования. – 2017. – №1. – С. 132-137.
17. Калинин Э.В., Панасьян Л.Л. Опыт применения геомodelей для изучения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород методами математического моделирования // 2015. – №6. – С.483-498.
18. <https://dprom.online/mtindustry/chislovoe-modelirovanie/>
19. <http://www.product.bsui.by/katalog/informacionnie-tehnologii/informacionnie-naukoemkie-tehnologii/geologija-i-gis/modelirovanie-geomehaniicheskikh-processov-v-massivah-gornih-porod/>
20. Каспарьян Э. В., Федотова Ю. В., Кузнецов Н. Н. Развитие представлений о естественном напряженном состоянии массивов скальных пород // Вестник Кольского научного центра РАН. – 3/2019 (11). – С.65-79.
21. Ермаков С.А., Гаврилов В.Л. Оценка разубоживания и потерь угля при валовой и селективной разработке сложноструктурных пластов Эльгинского угольного месторождения // Горная промышленность. 2012. №6 (106) С. 50-52.
22. Батугина Н.С., Гаврилов В.Л., Ткач С.М. Моделирование величины прибыли при разработке угольных месторождений // Горный журнал. 2017. №12. С. 41-45.
23. Батугина Н.С., Гаврилов В.Л., Ткач С.М. Погрешность изменения прибыли горного предприятия при разработке сложноструктурного месторождения // Горный журнал. 2018. №12. С. 26-30.
24. Gavrilov V.L., Khoiutanov E. A., Nemova N.A. and Son D. V. The role of digital simulation in assessing and reassessing the potential of complex coal deposits // VIII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources”. E3S Web of Conferences192, 03014 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019203014>
25. С.А. Ермаков, В.Л. Гаврилов, Д.В. Хосоев, Е.А. Хоютанов Улучшение качества угля за счет селективной разработки сложноструктурного Эльгинского каменноугольного месторождения // НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ. 2012. №1. С. 24-29.

26. Ермаков С.А., Иль А.П., Хосоев Д.В. Оценка эффективности применения комбайнов Wirtgen на Эльгинском каменноугольном месторождении // Горная промышленность. 2018. №6 (142) С. 77-79.

27. Немова Н.А., Гаврилов В.Л. О геомеханическом моделировании при ведении горных работ на Эльгинском месторождении // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2020, т. 2, № 1, С. 117-128. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-2-117-128.

© Н. А. Немова, А. В. Резник, В. Н. Карпов, 2021