

УДК 622.531:622.831

СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ



А. С. ДОЛГИХ,
главный инженер
Третьего РУ



В. В. СЕНЮК,
начальник рудника
Первого РУ

ОАО «Беларуськалий», Солигорск, Беларусь



О. Л. КОНОВАЛОВ,
доцент, канд. техн. наук,
Белорусский государственный
университет, Минск, Беларусь

Введение

Геомеханическое обеспечение и сопровождение горных работ представляет собой один из основных элементов всей цепочки комплексного процесса жизнедеятельности горнодобывающего предприятия: от проектирования, строительства, эксплуатации до его консервации. Очевидно, что если на этапах проектирования и строительства рудника опираются на инженерно-технические решения и опыт, накопленные ранее при изучении, проектировании и эксплуатации рудников в подобных (но все же иных) горно-геологических условиях, то при ведении и развитии горных работ базовыми являются исследования, выполненные для конкретных уникальных условий обрабатываемого массива горных пород.

Основы геомеханики Старобинского месторождения калийных солей на этапе проектирования рудников и начала ведения горных работ были заложены в исследованиях ученых ВНИИ Галургии, ЛГИ и базировались на обобщении закономерностей геомеханических процессов для условий большого числа калийных и угольных месторождений в мире [1, 2].

Фактически систематические и глубокие исследования в области геомеханики Старобинского месторождения калийных солей начали выполнять в Березниковском филиале (БФ) ВНИИ Галургии при создании лабораторий геомеханических исследований, горного давления и сектора сдвижений земной поверхности. В связи с этим хотелось бы отметить вклад таких ученых, как Э. Ф. Жидков, Ю. Н. Николаев, К. А. Степанов.

Описан современный подход к организации системы геомеханического сопровождения и обеспечения подземных горных работ на горнодобывающем предприятии. Показано, что эффективным представляется внедрение на предприятии системы регионального геомеханического мониторинга. Приведены внутреннее наполнение и содержание данной системы на примере ОАО «Беларуськалий».

Ключевые слова: подземные горные работы, геомеханическое сопровождение, корпоративная система, организация, региональный геомеханический мониторинг.

DOI: 10.17580/gzh.2018.08.01

Геомеханика массивов горных пород Старобинского месторождения обладает своими особенностями и спецификой, отличается от геомеханических процессов на калийных месторождениях в других странах. Поэтому для обеспечения безопасной и высокоэффективной работы рудников требовалось выполнить большие объемы экспериментальных, лабораторных и теоретических исследований, направленных на выявление характерных особенностей геомеханического поведения подрабатываемых массивов горных пород и разработку оригинальных геомеханических моделей применительно к массивам горных пород Старобинского месторождения.

Научно-технические исследования особенностей геомеханических процессов подрабатываемых пород Старобинского месторождения

Учеными БФ ВНИИ Галургии и сотрудниками инженерно-технических служб ПО «Беларуськалий» в тесном сотрудничестве с представителями научных учреждений Беларуси и России был выполнен большой объем научно-технических исследований. В результате разработаны уникальные технические решения, методики, рекомендации по геомеханическому сопровождению горных работ. В качестве примера можно упомянуть выполнение полного комплекса исследований по разработке и обоснованию таких мер охраны, как компенсационные щели и разгружающие выработки; разработку методик по расчету устойчивости выработок, выбору мер их охраны и крепления; геомеханическое обоснова-

ние новых технологических решений по отработке пластов полезного ископаемого длинными очистными забоями; оригинальные расчетные методики прогнозирования оседаний и сдвижений земной поверхности, расчета основных параметров водозащитной толщи и многое другое.

Базис выполненных исследований в области геомеханического обеспечения горных работ на рудниках Старобинского месторождения настолько прочный, что результаты исследований актуальны и востребованы и сегодня.

Вместе с тем в современных условиях с учетом развития и внедрения ИТ-технологий в производственные процессы подходы к выполнению геомеханических исследований и организации действующей системы геомеханического обеспечения и сопровождения горных работ претерпели существенные изменения и направлены на разработку и внедрение на горнодобывающем предприятии *корпоративной автоматизированной компьютерной системы сопряженного регионального геомеханического мониторинга* [3, 4].

Геомеханические исследования связаны с обработкой и анализом больших массивов данных (геологической, маркшейдерской, горнотехнической и другой информации), построением и работой со сложными комплексными моделями подрабатываемых участков породных массивов, решением сложных сопряженных задач (задачи гидрогеомеханики, геогазодинамики, геодинамики и т. д.). Кроме того, геомеханическое обеспечение и сопровождение горных работ без применения информационных систем и технологий сегодня невозможны.

Под *геомеханическим мониторингом* понимается организация комплексной системы выполнения экспериментальных (лабора-

торных, натурных) работ, режимных натурных наблюдений и измерений, модельных и инженерных исследований и расчетов, направленных на обеспечение безопасности ведения горных работ и предотвращение аварий и техногенных катастроф по всей глубине породной толщи и на земной поверхности в области влияния горных работ.

В соответствии с этим *систему регионального геомеханического мониторинга* можно определить как автоматизированную компьютерную информационно-измерительную и расчетно-аналитическую систему режимного (непрерывного, периодического, заданного) контроля, диагностики и прогноза общего геомеханического и сопряженных с ним состояний подземного и поверхностного пространства в регионе крупномасштабного ведения горных работ.

Создание систем регионального геомеханического мониторинга

В качестве главной цели разработки и создания систем регионального геомеханического мониторинга (СРГМ), ориентированных на использование в конкретных специфических условиях, ставится задача изучения и прогнозирования состояния и развития геомеханических и связанных с ними процессов и явлений, происходящих в породном массиве с позиций комплексного подхода: путем рассмотрения явлений и процессов не изолированно, а в качестве составных частей общей системы, используя методы физического, математического и компьютерного моделирования, аппаратное и приборное обеспечение. Кроме того, как основные выступают задачи разработки логически законченных инженерных технологий и технических решений.

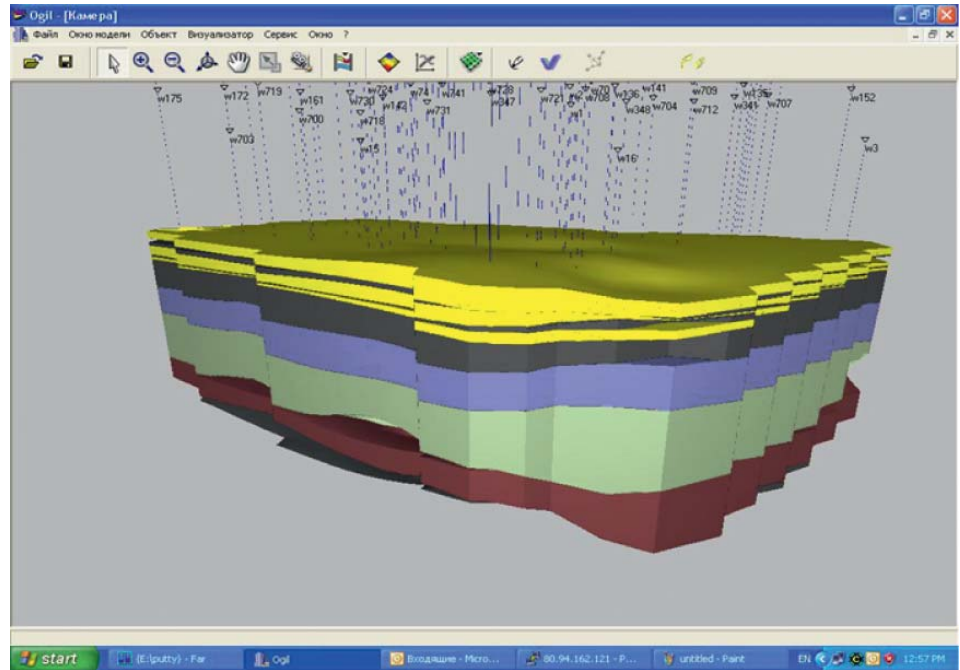
Многочисленные направления исследований, определяющие функциональность систем регионального геомеханического мониторинга в настоящее время, можно объединить в несколько блоков:

- изучение физико-механических и сопутствующих физических свойств горных пород, определение эффективных свойств породных массивов, построение численной структурной горно-геологической модели породной толщи;
- построение геомеханических и сопряженных гидро- и газогео-механических, геодинамических моделей для изучения и моделирования природных процессов в подрабатываемом породном массиве с учетом



Рис. 1. Общая структура системы регионального геомеханического мониторинга

Рис. 2. Пример построения информационной модели породного массива



различных технологий отработки продуктивных пластов;

- разработка моделей, методик расчета устойчивости, срока службы и мер охраны и крепления подземных выработок, сооружений, горных объектов;
- расчет и моделирование оседаний земной поверхности, состояния приповерхностных областей и объектов на поверхности;
- расчет и моделирование геомеханического состояния породных массивов в окрестности скважин, стволов и напряженно-деформированного состояния пород при креплении данных горных объектов;
- определение сопряженных геомеханических и геофильтрационных процессов в породном массиве; исследование техногенной трещиноватости подработанной породной толщи;
- изучение, оценка и обоснование технологических схем ведения горных работ;
- решение сопряженных задач геомеханики и механики подземных машин и механизмов;
- решение сопряженных задач геогидромеханики и тепло-массообмена;
- разработка компьютерных прикладных/инженерных систем/методик/моделей на базе современных CAD- FEM- и DEM-пакетов для реализации широкого спектра геомеханических и сопряженных моделей породных массивов с подземными сооружениями при решении всех типов и классов задач подземной и наземной геомеханики как на этапе проектирования рудника, так и его текущей эксплуатации;
- решение задачи комплексного мониторинга оценки состояния породной толщи от глубин ведения горных работ до земной поверхности путем организации системы наблюдений на базе современных технологий;
- разработка и внедрение специализированных горно-геологических информационных систем сопровождения горных работ (ГГИС), а также специализированного программного обеспечения для автоматизации выполнения инженерных расчетов;
- интеграция и использование данных систем гидрогеологического, сейсмологического, геодинамического мониторинга и других систем наблюдений для выработки наиболее оптимальных решений, обеспечивающих безопасную и эффективную работу горнодобывающего предприятия.

Фактический состав и наполнение СРГМ могут быть различными (последнее определяется, исходя из практических интере-

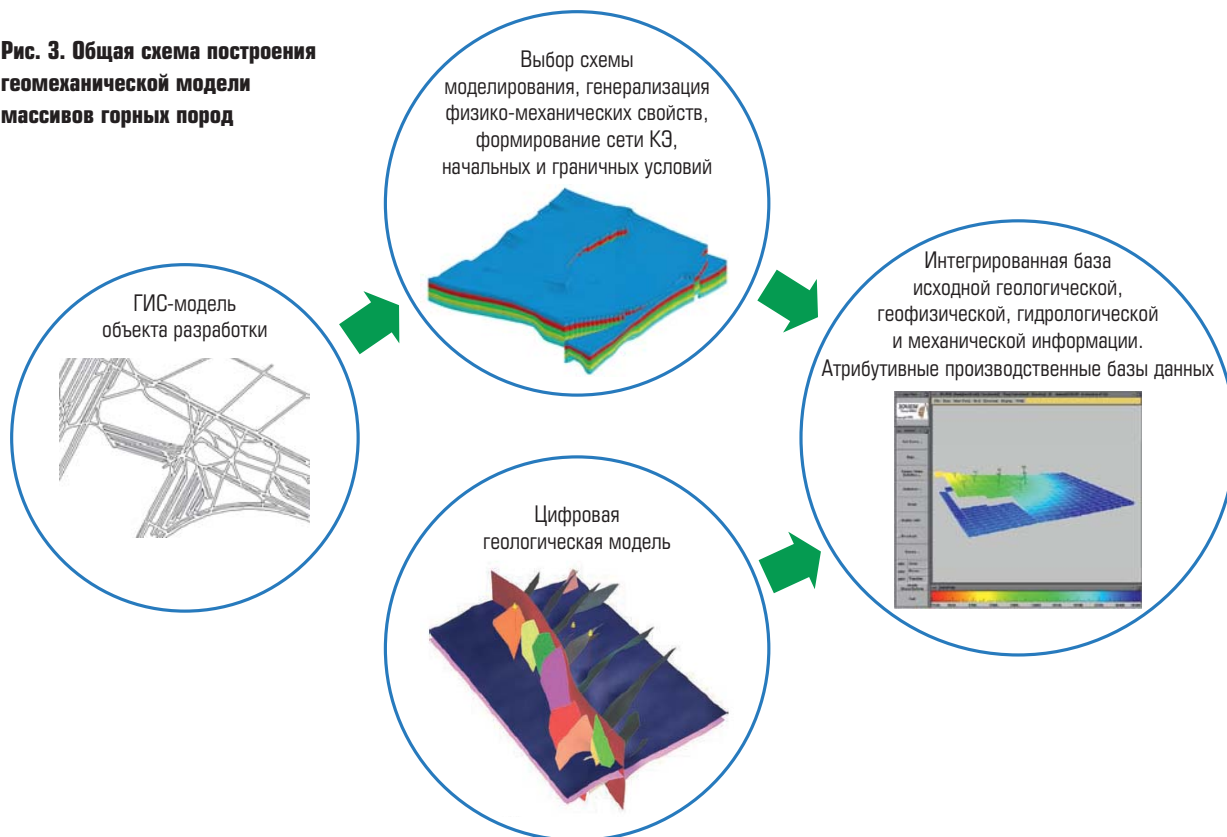
сов по конкретному району освоения подземного пространства), но с той либо иной степенью полноты каждая СРГМ должна включать в себя определенные базовые системы и комплексы (рис. 1).

Одной из первичных и наиболее актуальных задач для организации эффективной системы геомеханического сопровождения и обеспечения горных работ является разработка *сопряженных информационных моделей породного массива* от земной поверхности до глубин ведения горных работ [5, 6] (рис. 2). Только опираясь на такие модели, возможны моделирование и прогнозирование состояния подрабатываемого массива в целом, учитывая взаимообусловленность и взаимовлияние ее отдельных компонентов. Интегрированная информационная модель месторождения аккумулирует в себе данные, описывающие месторождение с различных сторон.

Общая интегрированная информационная модель массива (месторождения) в совокупности со специальным программным обеспечением составляет *информационное ядро СРГМ*. Последнее должно обеспечивать сбор и надежное упорядоченное хранение первичных данных, полученных в результате геологического сопровождения, разведочных работ, гидрогеологических, геофизических исследований, изучения скважин, мониторинга состояния гидросферы, наблюдений за оседаниями и деформациями земной поверхности, обработки архивных данных и т. д.

Авторами разработана специализированная объектно-ориентированная библиотека построения трехмерных сопряженных информационных моделей породного массива. В библиотеке реализована функциональность всех этапов построения модели: подготовка исходных данных; построение согласованной сети разломов; согласование структурных поверхностей; построение сеточной модели и т. д.

Рис. 3. Общая схема построения геомеханической модели массивов горных пород



Одним из основных и важных элементов СРГМ является комплекс математического и компьютерного моделирования и изучения геомеханических процессов. Очевидно, что для моделирования и выполнения расчетов необходимо на базе информационных моделей массивов горных пород и механико-математических моделей, описывающих рассматриваемые геомеханические процессы, построить геомеханическую модель исследуемой области породного массива (рис. 3).

В общей системе моделирования и изучения геомеханических процессов можно выделить несколько подсистем. Среди них, например, исследование устойчивости капитальных и подготовительных выработок; выбор и расчет мер охраны и крепления выработок; исследование геомеханического состояния массивов горных пород от глубин ведения горных работ до земной поверхности; деформационные процессы на земной поверхности и в приповерхностных областях; связанные задачи геомеханики, гидрогеомеханики и газовой динамики; общие задачи механики горных пород и механики горношахтного оборудования и др. [3, 6].

Наиболее эффективными технологиями, служащими теоретической основой методов компьютерного моделирования геомеханических процессов, являются технологии, базирующиеся на методах, составляющих группу экспериментально-аналитических методов [3, 7]. Подсистемы компьютерного моделирования строят на основе «смешанных» компьютерных технологий исследования общих механических явлений и процессов. «Смешанные» компьютерные технологии основаны на ис-

пользовании одновременно нескольких методов (наиболее часто МКЭ, МГИУ, МДЭ). Такой подход начинает доминировать сегодня в целом при создании коммерческих прикладных пакетов. Главное преимущество таких технологий заключается в том, что они позволяют использовать наиболее «сильные» стороны каждого метода [3].

При моделировании НДС породного соляного массива для достаточно широкого класса задач эффективным представляется использование модели трансверсально-изотропного вязкоупругого деформируемого твердого тела [3, 8]. Вместе с тем, например, при моделировании геомеханических процессов в подрабатываемой породной толще с учетом динамики подвигания лавы использование таких моделей оказывается неэффективным. В первую очередь необходимо отметить факт влияния скорости нагружения массива на деформационные процессы. На практике это выражается в том, что более высокая скорость проходки вызывает большую скорость оседания. Используя «классические» модели, не удастся явно воспроизвести указанную зависимость. В качестве решения предложено применять технологию явного описания трещиноватости с помощью «механизма скольжения краев контактов разнородных литологических разностей». При использовании конечно-элементных моделей такое поведение обеспечивается использованием специальных контактных slide-элементов. Перспективным подходом к моделированию естественной трещиноватости породного массива оказалось использование смешанных технологий на основе FEM- и DEM-подходов.

Для моделирования пликативных массивов осадочных пород с ярко выраженной слоевой дифференциацией физико-механических свойств (что характерно для Старобинского месторождения калийных солей) предложено использовать «смешанные» конечно-элементные модели, удовлетворяющие определенным правилам. Предполагается однородность по физико-механическим свойствам слоев, которые при вертикальных оседаниях не образуют внутри себя горизонтальных отслоений (что позволяет рассматривать такие образования в виде слоя конечных элементов – FEM-элементы – с одинаковыми свойствами). На контактах слоев с существенно различными физико-механическими свойствами задают специальные контактные элементы – DEM-элементы. При этом такие контактные элементы обладают «несимметричным» поведением при сжатии-растяжении, а именно: обладают достаточно высоким модулем Юнга при сжатии (чтобы не допустить проникновения одного слоя в другой), но, с другой стороны, очень низким модулем деформации при растяжении (что позволяет имитировать процесс горизонтального расслоения массива).

Кроме введения контактных слоев существенной модификации требует и технология формирования выработанного пространства. В моделях, применяемых ранее, выработанное пространство формировали с помощью механизма удаления элементов. Такой подход хорошо себя зарекомендовал при моделировании НДС массива при камерной системе разработки, когда камеры не разрушаются в течение длительного времени. При использовании технологии добычи длинными очистными забоями происходит быстрое смыкание кровли и подошвы. Моделирование такого процесса при реализации механизма удаления элементов требует добавления в цикл расчета НДС специального шага для контроля пересечения элементов кровли и подошвы

лавы. При обнаружении пересечения необходимо выполнить склейку узлов пересекающихся элементов. Все это существенно замедляет скорость работы и понижает устойчивость алгоритма. Изменение числа узлов после склейки приводит к дорогостоящей процедуре «перелокации» матрицы жесткости FEM-алгоритма.

Еще одним недостатком «традиционного» способа формирования выработанного пространства является невозможность адекватного моделирования разрушения краевых зон лавы. Краевые элементы либо деградируют, что приводит к расхождению алгоритма, либо остаются неразрушенными. В результате этого получается так называемая модель «с жестким краем», при этом, например, расчетная муфта оседания существенно отличается от наблюдаемой в действительности.

В качестве решения описанной проблемы предложено моделировать выработанное пространство контактными элементами еще одного специального типа. В частности, используют специальный «несимметричный» контактный элемент, длина которого составляет удвоенную мощность лавы. Подвигание лавы имитируют тем, что в заданный момент времени длину элемента уменьшают вдвое. Предлагаемый подход позволяет также моделировать разрушение края выработки, задавая пластическое поведение контактного элемента при достижении критического сжатия.

Заключение

Таким образом, в соответствии с разработанными алгоритмами и применяемыми технологиями построены сложные геомеханические модели, используемые при прогнозировании геомеханических и сопряженных с ними процессов для различных участков Старобинского месторождения калийных солей Республики Беларусь [3, 4, 6, 9–11].

Библиографический список

1. Букша Ю. В. Становление и развитие ВНИИГалургии за 75 лет // Горный журнал. 2007. № 8. С. 5–9.
2. Букша Ю. В. О вкладе ВНИИГ в становление и развитие калийной отрасли в России // Рудник будущего. Научно-технический журнал. 2011. № 1. С. 41–43.
3. Журавков М. А., Коновалов О. Л., Богдан С. И., Прохоров П. А., Круподеров А. В. Компьютерное моделирование в геомеханике / Под общ. ред. М. А. Журавкова. – Минск : БГУ, 2008. – 443 с.
4. Журавков М. А. Роль и место корпоративных автоматизированных систем сопряженного геомониторинга в основных технологических процессах современного горнодобывающего предприятия // Рудник будущего. Научно-технический журнал. 2010. № 3. С. 108–112.
5. Журавков М. А., Хвесеня С. С. Построение интегрированных конечно-элементных моделей массивов горных пород и подходы к их верификации // Горная механика и машиностроение. 2010. № 3. С. 27–40.
6. Zhuravkov M., Kanavalau A. Elaboration of applied technologies for modeling connected geomechanical, geofiltration and geodynamic processes in rock's massifs // The 2010 World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing-WORLDCOMP'10. Proceedings of the International Conference on Data Mining (DMIN'10). Editors: Robert Stahlbock and Sven F. Crone / Las Vegas, Nevada, USA. July 12-15.2010. P. 112–118.
7. Журавков М. А. Математическое моделирование деформационных процессов в твердых деформируемых средах (на примере задач механики горных пород и массивов). – Минск : БГУ, 2002. – 456 с.
8. Журавков М. А., Старовойтов Э. И. Механика сплошных сред. Теория упругости и пластичности. – Минск : БГУ, 2011 – 543 с.
9. Zhuravkov M. A., Konovalov O. L., Krupoderov A. V., Bogdan S. I. The influence of tectonic fractures on the stress-strain state of rock massive with underground mining // Proceedings of the Vth International Geomechanics Conference. 18–21 June 2012, Varna, Bulgaria. 2012. P. 130–136.
10. Zhuravkov M. A., Krupoderov A. V., Konovalov O. L. Study of the stress-strain state in the mined potassium massif with inclined bedding // Geomaterials. 2014. No. 4. P. 1–10.
11. Журавков М. А., Коновалов О. Л., Круподеров А. В., Хвесеня С. С. Использование компьютерного моделирования на конкретных участках отработки полезных ископаемых на основе построенных трехмерных геомеханических моделей породного массива // Изв. вузов. Горный журнал. 2014. № 8. С. 62–70. **ГЖ**

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 8, pp. 23–28
 DOI: 10.17580/gzh.2018.08.01

System of geomechanical support for underground mining at the Starobin deposit

Information about authors:

A. S. Dolgikh¹, Chief Engineer of Mine Management 3

V. V. Senyuk¹, Head of Mine, Mine Management 1

O. L. Kononov², Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences, konoval@bsu.by

¹ Belaruskali, Soligorsk, Belarus

² Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract

Geomechanical support and monitoring of mining operations is one of the key elements in the chain of an integrated process of mine performance starting from the mine planning and design, to construction, operation and up to closure. The Starobin deposit rock mass features specific geomechanical behavior, different from geomechanical processes at potash deposits in other countries. For this reason, safe and efficient mining requires excessive experimental, laboratory and theoretical research aimed to detect characteristic patterns in geomechanical behavior and to develop specific original geomechanical models for the Starobin deposit. This article describes a modern approach to the arrangement of geomechanical support and monitoring in underground mining. In terms of Belaruskali, the algorithm of a corporate automated platform for integrated regional geomechanical monitoring is examined. The complex geomechanical models are constructed for prediction of geomechanical and related processes in various mining areas at the Starobin potash salt deposit.

Keywords: underground mining, geomechanical support, corporate system, organization, regional geomechanical monitoring.

References

1. Buksha Yu. V. Initiation and growth of VNIIG Galurgii Research Institute. *Gornyi Zhurnal*. 2007. No. 8. pp. 5–9.
2. Buksha Yu. V. Contribution of VNIIG to development and growth of potash mining industry in Russia. *Rudnik budushchego. Nauchno-tehnichskii zhurnal*. 2011. No. 1. pp. 41–43.
3. Zhuravkov M. A., Kononov O. L., Bogdan S. I., Prokhorov P. A., Krupoderov A. V. Computer Modeling in Geomechanics. Minsk: BGU, 2008. 443 p.
4. Zhuravkov M. A. Role and place of corporate automated integrated geomonitring systems in the main processes of a modern mine. *Rudnik budushchego. Nauchno-tehnichskii zhurnal*. 2010. No. 3. pp. 108–112.
5. Zhuravkov M. A., Khvesenya S. S. Integrated finite-element models of rocks and verification approaches. *Gornaya mekhanika i mashinostroyeniye*. 2010. No. 3. pp. 27–40.
6. Zhuravkov M., Kanavalau A. Elaboration of applied technologies for modeling connected geomechanical, geofiltration and geodynamic processes in rocks massifs. *2010 World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing-WORLDCOMP'10: Proceedings of the International Conference on Data Mining (DMIN'10)*. Las Vegas, 2010. pp. 112–118.
7. Zhuravkov M. A. Mathematical Modeling of Deformation in Solid Media (In Terms of Problems of the Mechanics of Rocks and Rock Masses). Minsk: BGU, 2002. 456 p.
8. Zhuravkov M. A., Starovoitov E. I. Mechanics of Continuum Media. Theory of Elasticity and Plasticity. Minsk: BGU, 2011. 543 p.
9. Zhuravkov M. A., Kononov O. L., Krupoderov A. V., Bogdan S. I. The influence of tectonic fractures on the stress-strain state of rock massive with underground mining. *Proceedings of V International Geomechanics Conference*. Varna, Bulgaria, 2012. pp. 130–136.
10. Zhuravkov M. A., Krupoderov A. V., Kononov O. L. Study of the stress-strain state in the mined potassium massif with inclined bedding. *Geomaterials*. 2014. No. 4. pp. 1–10.
11. Zhuravkov M. A., Kononov O. M., Krupoderov A. V., Khvesenya S. S. Computer modeling of specific mine areas based on constructed 3D geomechanical models of rock mass. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2014. No. 8. pp. 62–70.

