

Геоинформационные технологии сопровождения процессов горного производства

И.В. Соколов, С.В. Корнилков, А.А. Панжин ✉

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация
✉ panzhin@igduran.ru

Резюме: Приведены задачи, методы и результаты проводимых в Институте горного дела Уральского отделения Российской академии наук комплексных исследований в области геоинформатики и развития сырьевой базы горно-металлургического комплекса. Основные задачи исследований: оценка методов информационно-аналитического сопровождения недропользования, средств и методов многоуровневой обработки геоданных, цифрового моделирования геобъектов и комплексного геомониторинга; обоснование методов комплексного геомониторинга, обеспечивающих комплексное освоение недр Земли при безопасном антропогенном воздействии на геосреду; разработка методов информационно-аналитического сопровождения недропользования для решения задач комплексного освоения минерального сырья. В результате обоснованы критерии оценки защищенности горнопромышленных территорий; оценена интенсивность процесса самореставрации нарушенных горными работами территорий; предложен методический подход к накоплению и обработке данных геодинамического и геоинформационного мониторинга горнопромышленных территорий во взаимной геопространственной увязке; предложена систематизация факторов, объектов и видов рисков при недропользовании, порождающих негативные процессы, позволяющая обосновать совокупность геоданных, необходимых для оценки вероятности реализации конкретного вида риска.

Ключевые слова: геоинформационные технологии, сопровождение недропользования, цифровое моделирование, геомониторинг, риски недропользования, горнопромышленные территории, защищенность природной среды

Для цитирования: Соколов И.В., Корнилков С.В., Панжин А.А. Геоинформационные технологии сопровождения процессов горного производства. *Горная промышленность*. 2023;(5S):41–46. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-41-46>

Geoinformation technologies to support mining processes

I.V. Sokolov, S.V. Kornilkov, A.A. Panzhin ✉

Institute of Mining of Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation
✉ panzhin@igduran.ru

Abstract: The paper presents the tasks, methods and results of comprehensive research in geoinformatics and in development of raw material base of the mining and metallurgical complex that are conducted at the Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The main objectives of the research include evaluation of methods of information and analytical support for the use of subsurface resources, means and methods of multi-tier processing of geodata, digital modeling of geo-objects and complex geomonitoring; substantiation of methods of complex geomonitoring that ensure the integrated development of subsurface resources of the Earth with a safe level of anthropogenic impact on the geo-environment; development of methods of information and analytical support for subsurface resources to solve the challenges of integrated development of mineral raw materials. As the result, criteria for assessing the protection of mining territories are justified; the intensity of the self-restoration process of areas disturbed by mining operations is estimated; a methodical approach to the accumulation and processing of geodynamic and geoinformation monitoring data from mining territories in mutual geospatial correlation is proposed; a systematization of factors, objects and types of risks in subsoil use that generate negative effect. This approach helps to justify the range of geodata required to assess the probability of a specific type of risk.

Keywords: geoinformation technologies, support of subsoil use, digital modeling, geomonitoring, risks of subsoil use, mining territories, protection of natural environment

For citation: Sokolov I.V., Kornilkov S.V., Panzhin A.A. Geoinformation technologies to support mining processes. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S.):41–46. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-41-46>

Введение

При обосновании структуры комплексного геоинформационного мониторинга и разработке методов информационно-аналитического обеспечения сопровождения процессов горного производства основной целью исследований ставится создание комплексных подходов к системной оценке данных мониторинга развития опасных процессов, основанных на решении следующих частных задач: модернизации структуры и состава математического и программного обеспечения геоинформационной системы; разработки методов интерпретации данных горного, геомеханического, экологического и гидрогеохимического мониторинга и прогноза состояния среды на основе численного моделирования; обоснования критериев оценки состояния горнопромышленных территорий как природно-технологических систем на разных этапах их жизненного цикла; формирования системы индикаторов оценки изменения горнотехнологических условий разработки на основании мониторинга динамики горных работ.

Актуальными являются следующие задачи:

- формирование геоинформационных систем, ориентированных на безопасность природо- и недропользования, а в части горных работ – контроль состояния дневной поверхности, деформаций массива, техническое состояние объектов горного производства, провоцирующих развитие опасных ситуаций техногенного характера;

- проведение исследований, ориентированных на контроль и мониторинг качества защищенности природной среды, пылегазовых выбросов, загрязнения поверхностных и подземных вод, самозаращения и контроля угнетенности биоты с использованием средств дистанционного зондирования на базе беспилотных летательных аппаратов, аэро- и космической съемки;

- комплексные исследования перспектив развития и сырьевой базы горно-металлургического комплекса, ориентированного на создание промышленных кластеров, потребляющих спецстали с заданными свойствами;

- формирование системы мониторинга и обоснования параметров технологий переработки и нейтрализации геогидроминеральных ресурсов, сформированных при закрытии или консервации горных предприятий за счет выщелачивания потерь и остатков некондиционных руд в процессе восстановления депрессионной воронки;

- обоснование параметров систем рудоподготовки, основанной на выделении и отработке руд по природным типам с целью повышения качества производимых концентратов и извлечения горнорудного сырья.

Методы

Необходимым условием надежного функционирования геоинформационных и мониторинговых систем как информационного базиса для мониторинга горных работ и рудоподготовительных комплексов во времени обработки является получение геопространственных данных с использованием современных инноваций (применение БПЛА, GPS-ГЛОНАСС, навигация и диспетчеризация грузопотоков, организация автоматизированных комплексов контроля рудопотоков, складов и рудных перегрузочных пунктов и др.). При этом обработку данных геомониторинга рекомендуется осуществлять в нескольких типовых вариантах: прямая задача расчета зон техногенного воздействия; обратная задача нахождения областей, адаптированных под заданные ограничения; генерирование сценария возникновения природно-техногенных катастроф и

аварий с развитием опасных ситуаций во времени, а также предупреждения и ликвидации их последствий; задача обобщения, формирующая прогноз и тенденции развития того или иного процесса или явления.

Проблема обоснования необходимого состава и структуры математического обеспечения геомониторинга является особенно важной в условиях современного развития новых цифровых информационно-компьютерных технологий. В этом направлении исследованы критерии качества геоинформационного отображения признаков геосистем горного предприятия, что привело к формированию новых принципов регрессионной интерпретации данных мониторинга.

В исследованиях по непосредственному сопровождению процессов горного производства использован критерий оценки изменений природно-технологической системы при недропользовании, представляющий собой комплексный безразмерный аддитивный показатель, учитывающий сумму трансформированных факторов при переходе от исходного к фактическому (прогнозируемому) положению с учетом весовой доли каждого из них. Разработанный алгоритм оценки изменения используется при создании программного обеспечения цифровых двойников, представляющих собой имитационные модели основных горнотехнологических процессов (бурение скважин, разрушение скального горного массива, экскавация, управление качеством добываемого сырья). В связи с этим поставлены и решены задачи определения структуры математического обеспечения мониторинга, включая системную связь его целей и задач, видов геоданных и описывающих их моделей, этапов математического обеспечения, взаимосвязь признаков геосистем горного предприятия и критериев качества их геоинформационного отображения, а также принципов регрессионной интерпретации данных мониторинга [1].

Методы технологического обоснования закономерностей зарождения опасных производственных ситуаций (ОПС) включают условия и закономерности возникновения ОПС, которые включают: факторы, влияющие на безопасность работ: природные, технологические, организационные; условия, обуславливающие появление ОПС: повторяемость работ или объектов, отсутствие резерва, экономические соображения. Выявлены основные предпосылки, ранние признаки и проявления (индикаторы) наиболее распространенных опасных производственных ситуаций, базирующиеся на данных технологического и геоинформационного мониторинга процессов, обеспечивающих снижение производственного риска [2].

Методика геоинформационного анализа, основанная на выделении областей (зон) по типам «техногенного поражения», используется при решении задач системной оценки совокупного техногенного влияния объектов горнодобывающих предприятий на окружающую среду.

Результаты

Установлено, что неперемным условием, порождающим возмущения в процессах горного производства, является перемещение горных работ в пространстве и времени, обуславливающее периодическое изменение производственной, экологической и внутриэкономической ситуации. Установлено, что системным свойством переходных процессов горнодобывающего производства является наличие взаимодействующих между собой природно-технологических подсистем. Их взаимодействие сопровождается

возникновением сопротивления взаимопроникновению, поэтому важным следствием является необходимость динамического контроля ряда индикаторов, установленных на стадии разработки проектов и планов горных работ, т.е. осуществлять их комплексный геоинформационный мониторинг. Выделены риски, определяющие комплексную безопасность горных работ: природные, технологические, организационные, а также условия, сопровождающие возобновление опасных ситуаций: циклическая повторяемость работ или действий, отсутствие планового резерва, организационно-экономические факторы.

Показано, что защищенность горнопромышленной территории, как состояние сложной системы, характеризует ее безопасность, которая оценивается способностью сохраняться, когда воздействие на нее внешних и внутренних факторов по имеющимся на данном этапе знаниям не приводит к развитию негативных процессов, а риск или ущерб принесенного (полученного) вреда ограничен допустимым уровнем. Применительно к комплексной оценке данных геоинформационного мониторинга горнотехнических систем защищенность оценивается рядом количественных характеристик и взаимозависящих показателей – индикаторов, характеризующих устойчивость системы к негативным воздействиям (рис. 1).

В результате предложена методика оценки и мониторинга совокупного техногенного воздействия горных работ на

геосреду, основанная на выделении областей (зон) по типам «техногенного поражения» георесурсов и геосистем, трансформирующихся в пространстве и времени. При этом формирование системы индикаторов оценки состояния горнопромышленных территорий как природно-технологических систем на разных этапах их жизненного цикла предлагается основывать на идеологии моделирования переходных процессов, параметры которых контролируются по данным геоинформационного мониторинга [3].

Для обоснования экологических критериев оценки защищенности горнопромышленных территорий предложена совокупность эколого-экономических индикаторов, характеризующих биогеохимические особенности формирования природно-техногенных комплексов и трансформации земельных ресурсов. Экспериментальными исследованиями перераспределения тяжелых металлов в системе «техногенный поток сточных промышленных вод – биогеохимический барьер» установлено, что искусственно сформированный барьер из отходов железомagneзиевого производства («паста»), позволяет увеличить в нем концентрацию меди с 41,25 до 1264,8 мг/кг, цинка с 77,7 до 4885,0 мг/кг, тем самым уменьшить дальнейшую миграционную активность исследуемых элементов [4; 5].

На примере Левихинского медноколчеданного месторождения разработана методика численного моделирования состояния гидросферы. Обоснованы и уточнены

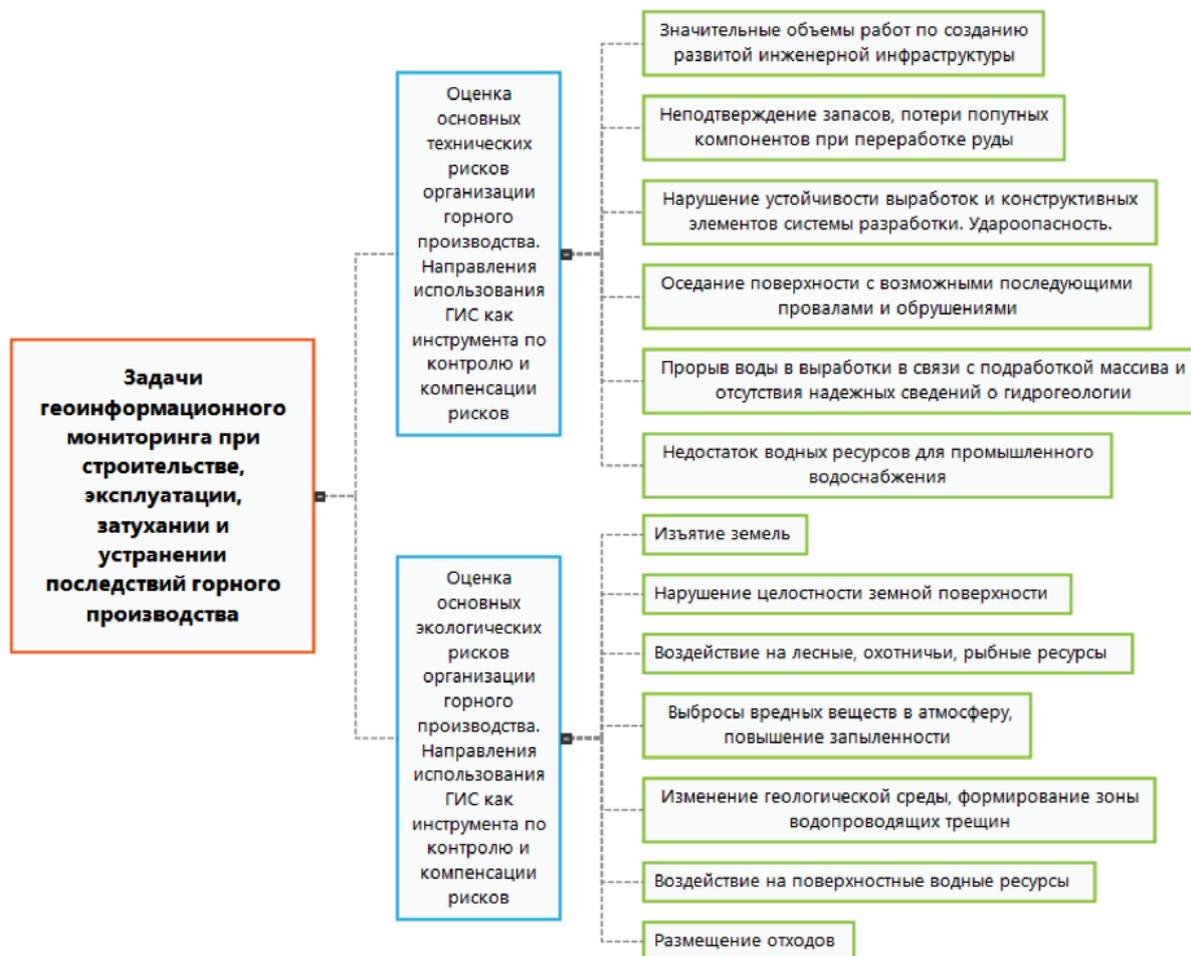


Рис. 1
Задачи геоинформационного мониторинга при оценке рисков организации горного производства

Fig. 1
Tasks of geoinformation monitoring in assessing the risks of mining production organization

индикаторы распределения геофильтрационных параметров массива горных пород в области гидродинамического влияния рудников, индикаторы изменения составляющих водоотлива (дренажа), инфильтрационного питания и подтопления территории водосбора на разных этапах развития горных работ. На основании впервые выполненных высокоточных полевых измерений параметров, определяющих окислительно-восстановительные условия поверхностных и подземных вод района Левихинского рудника, а также расчета форм миграции загрязняющих компонентов раскрыт механизм формирования химического состава кислых шахтных вод, их трансформации после выхода на поверхность и последующей нейтрализации, создана структура объектной ГИС оценки и прогноза изменения гидрохимической и гидрологической обстановки [6].

Для оценки воздействия влияния горных работ на геодинамическую опасность предложен методический подход к решению задачи накопления и обработки данных мониторинга горнопромышленных территорий (рис. 2), основанный на: выделении активных тектонических структур массива горных пород, которые могут являться «оптимально ориентированными нарушениями», инициированными антропогенной деятельностью; использовании комплекса сейсмических, геологических, геодезических и геопрограммных (геоинформационных) данных с целью идентификации и визуализации современных геодинамических движений, что позволяет районировать массив по зонам концентрации природных и техногенных деформаций [7; 8].

На основе систематизации горно-геологических условий отработки запасов на ведущих железорудных горно-обогатительных комбинатах Российской Федерации, лабораторного изучения свойств титаномagnetитовой руды Гусевогорского месторождения, аналитических исследований по оценке признаков, определяющих типы руд, разработана методика и апробированы алгоритмы математической обработки массива исходной геологической информации,

формирования базы входных данных и блочного моделирования геообъектов с целью выделения и геометризации руд с характерными технологическими признаками. Для решения задач управления качеством минерального сырья с учетом динамики горно-геологических условий освоения запасов разработаны основные положения методики выбора систем рудоподготовки с учетом результатов геоинформационного моделирования качественного и пространственного расположения промышленных типов и сортов руд, изменяющихся требований к продуктам обогащения сырья, горнотехнических, эколого-экономических и организационных факторов [9; 10].

Для оценки эффективности использования горнотранспортного оборудования разработана методика и апробирован комплекс аппаратуры для мониторинговых экспериментальных замеров параметров работы карьерной транспортной техники в «естественных» условиях функционирования, позволяющие получать достоверные данные и верифицировать имитационные модели транспортных систем карьеров. Аппаратно-методический комплекс является макетом для разработки методов автоматизированного сбора и обработки данных при формировании элементов цифрового горного производства. Получены новые данные о параметрах работы карьерных автосамосвалов в условиях реального карьера. Они использованы для определения исходных данных при имитационном моделировании движения карьерного автосамосвала по карьерным автодорогам и последующей проверки адекватности модели [11].

В целях цифровизации управления процессами буровзрывных работ систематизированы основные факторы, определяющие изменение условий подготовки горной массы к выемке буровзрывным способом, предложены технологические приемы реализации переходных процессов, компенсирующие негативное влияние переменной среды и повышающие эффективность инноваций в технологию буровзрывных работ. Наиболее значимыми призна-



Рис. 2
Схема методического подхода к решению задачи накопления и обработки данных мониторинга горнопромышленных территорий

Fig. 2
A schematic diagram of the methodological approach to solving the challenges of accumulating and processing data on monitoring of mining territories

ны технические мероприятия, связанные с получением оперативных данных о состоянии горных пород в естественном залегании, влияющие на изменение средств инициирования, схем коммутации, конструкции зарядов, а также рецептуры взрывчатых веществ. Указанные параметры, коррелирующиеся с выбором способа бурения, конструкцией станка и бурового инструмента, имеют значительные внутренние резервы и подлежат системной оптимизации [12–13].

Заключение

В Институте горного дела Уральского отделения РАН проводятся комплексные фундаментальные и прикладные научные исследования, направленные на разработку геоинформационных технологий сопровождения процессов горного производства.

1. Разработаны методы информационно-аналитического сопровождения процессов недропользования

для решения задач освоения минерального сырья на основе многоуровневой обработки геоданных, цифрового моделирования геообъектов и комплексного геомониторинга.

2. Выполнена оценка методов информационно-аналитического сопровождения недропользования, средств и методов многоуровневой обработки геоданных, цифрового моделирования геообъектов и комплексного геомониторинга.
3. Обоснованы методы комплексного геомониторинга, обеспечивающие комплексное освоение недр Земли при безопасном антропогенном воздействии на геосреду.
4. Разработаны методы информационно-аналитического сопровождения недропользования для решения задач комплексного освоения минерального сырья.

Список литературы

1. Яковлев В.Л., Корнилов С.В., Соколов И.В. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Екатеринбург: Уральское отделение РАН; 2018. 360 с.
2. Корнилов С.В., Кравчук И.Л. О мониторинге опасных производственных ситуаций на угледобывающем предприятии. *Промышленность и безопасность*. 2021;(8):46–49.
3. Корнилов С.В., Кравчук И.Л., Черепанов В.А. Индикаторы зарождения опасных производственных ситуаций в данных комплексного мониторинга состояния горных работ. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2023;(1):89–100. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2023-1-89-100>
4. Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А., Шепель К.В., Собенин А.В., Усманов А.И. Оценка возможности использования отходов производства при разработке мероприятий по иммобилизации тяжелых металлов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(5-1):46–55. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_51_0_46
5. Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А., Собенин А.В., Усманов А.И. Оценка возможной деградации экосистемы при использовании промышленных отходов горнометаллургического комплекса при ликвидации горных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-2):193–201. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_193
6. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Оценка факторов формирования гидросферы природно-технических систем (на примере верховьев бассейна реки Тагил, Свердловская область). *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-2):257–272. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_257
7. Panzhin A.A., Panzhina N.A. Spatial and temporal stability of a reference frame as the basis of deformation monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;991:012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/991/1/012046>
8. Мельник В.В. (ред.). *Геомеханические аспекты недропользования*. Екатеринбург: Уральское отделение РАН; 2022. 256 с. Режим доступа: https://igduran.ru/files/ebooks/pdf/2022_geomekhanika.pdf?ysclid=lp6x2vwwn712787361
9. Яковлев В.Л., Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Основные направления совершенствования методов рудоподготовки минерального сырья. *Проблемы недропользования*. 2019;(3):95–106. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.03.095>
10. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Применение геоинформационных технологий блочного моделирования для совершенствования методов оценки качественных показателей полезных ископаемых. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2021;(1):63–73. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-1-63-73>
11. Журавлев А.Г., Ченцов П.А. Возможности автоматизированной оптимизации работы транспортных систем карьеров на основе мультиагентного подхода. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(S37):141–150. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-37-141-150>
12. Regotunov A.S., Sukhov R.I., Grashchenko D.A. Identifying factors which induce transitive processes in blasthole drilling in structurally complex rock masses. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;991:012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/991/1/012001>
13. Жариков С.Н., Кутуев В.А. О свойствах объекта разрушения и параметрах взрывной отбойки на карьерах. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2022;(3):283–289. <https://doi.org/10.25635/06455-6861-0824-g>

References

1. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V. *Innovation basis for the strategy of integrated development of mineral resources*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2018. 360 p. (In Russ.)

2. Kornilkov S.V., Kravchuk I.L. On monitoring hazardous industrial situations at a coal-mining operation. *Promyshlennost i bezopasnost*. 2021;(8):46–49. (In Russ.)
3. Kornilkov S.V., Kravchuk I.L., Cherepanov V.A. Indicators of the emergence of hazardous production situations in the integrated monitoring data of the state of mining operations. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2023;(1):89–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2023-1-89-100>
4. Antoninova N.Yu., Shubina L.A., Shepel K.V., Sobenin A.V., Usmanov A.I. Assessment of the possibility of using industrial waste in the development of measures for the immobilization of heavy metals. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(5-1):46–55. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_51_0_46
5. Antoninova N.Yu., Shubina L.A., Sobenin A.V., Usmanov A.I. Assessment of possible ecosystem degradation during mine closure using mining and metallurgical waste. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5-2):193–201. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_193
6. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Assessment of hydrosphere formation factors in nature-and-technology systems: a case-study of the upstream basin of the Tagil river in the Sverdlovsk region. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5-2):257–272. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_257
7. Panzhin A.A., Panzhina N.A. Spatial and temporal stability of a reference frame as the basis of deformation monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;991:012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/991/1/012046>
8. Melnik V.V. (ed.). *Geomechanical aspects of subsoil use*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2022. 256 p. (In Russ.) Available at: https://igduran.ru/files/ebooks/pdf/2022_geomekhanika.pdf?ysclid=lp6x2vwwn712787361
9. Yakovlev V.L., Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S. Main directions for improving the methods of ore preparation of mineral raw materials. *Problems of Subsoil Use*. 2019;(3):95–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.03.095>
10. Kantemirov V.D., Iakovlev A.M., Titov R.S. Applying geoinformation technologies of block modelling to improve the methods of assessing quality indicators of minerals. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2021;(1):63–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-1-63-73>
11. Zhuravlev A.G., Chentsov P.A. Possibilities of automated optimization of in-pit transport systems based on the multi-agent approach. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(S37):141–150. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-37-141-150>
12. Regotunov A.S., Sukhov R.I., Grashchenko D.A. Identifying factors which induce transitive processes in blasthole drilling in structurally complex rock masses. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;991:012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/991/1/012001>
13. Zharikov S.N., Kutuev V.A. About the properties of the object of destruction and the parameters of explosive breakage at quarries. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;(3):283–289. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/o6455-6861-0824-g>

Информация об авторах

Соколов Игорь Владимирович – доктор технических наук, директор, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Корнилков Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Панжин Андрей Алексеевич – кандидат технических наук, ученый секретарь, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: panzhin@igduran.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 02.10.2023

Поступила после рецензирования: 07.11.2023

Принята к публикации: 20.11.2023

Information about the authors

Igor V. Sokolov – Dr. Sci. (Eng.), Director, Institute of Mining of Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

Sergey V. Kornilkov – Dr. Sci. (Eng.), Professor. Chief Research Associate, Institute of Mining of Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

Andrey A. Panzhin – Cand. Sci. (Eng.), Academic Secretary, Institute of Mining of Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: panzhin@igduran.ru

Article info

Received: 02.10.2023

Revised: 07.11.2023

Accepted: 20.11.2023