

Цифровая трансформация – условие и основа устойчивого развития горнотехнических систем

М.В. Рыльникова✉, К.И. Струков, Д.Н. Радченко, Е.Н. Есина

Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук им. академика Н.В. Мельникова,
г. Москва, Российская Федерация

✉ rylnikova@mail.ru

Резюме: Представлен анализ направлений развития цифровой трансформации горнотехнических систем, предусматривающей внедрение цифровых технологий в различные бизнес-процессы предприятий горнодобывающей отрасли. Определены основные этапы перехода к новым технологическим укладам при разработке месторождений полезных ископаемых с применением интеллектуальных систем и цифровых технологий с учетом специфики горного производства. Предложены основные направления методологического обеспечения рейтинговой оценки ESG горнодобывающих компаний. Показано, что при развитии научно-методических основ устойчивого развития горнотехнических систем важно обоснование принципов создания информационных технологий работы с большими массивами данных в решении задач проектирования, эксплуатации, консервации и ликвидации горнотехнических систем.

Ключевые слова: цифровая трансформация, условия, принципы, горнотехническая система, рейтинговая оценка ESG

Для цитирования: Рыльникова М.В., Струков К.И., Радченко Д.Н., Есина Е.Н. Цифровая трансформация – условие и основа устойчивого развития горнотехнических систем. *Горная промышленность*. 2021;(3):74–78. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-74-78.

Digital Transformation: a Prerequisite and Foundation for Sustainable Development of Mining Operations

M.V. Rylnikova✉, K.I. Strukov, D.N. Radchenko, E.N. Esina

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ rylnikova@mail.ru

Abstract: The paper analyzes the development trends in digital transformation of mining operations, which involves introduction of digital technologies into various business processes with mining companies. The main stages in transition to the new technological modes in mining of mineral deposits using intelligent systems and digital technologies are identified with due account for the specific features of the mining industry. The main ways of methodological support for the ESG rating of mining companies are proposed. It is shown that in the development of scientific and methodological foundations of sustainable development of mining operations it is important to justify the design principles for information technologies to work with Big Data to solve issues concerned with designing, operation, conservation and closure of mining operations..

Keywords: digital transformation, prerequisites, principles, mining operation, ESG rating

For citation: Rylnikova M.V., Strukov K.I., Radchenko D.N., Esina E.N. Digital Transformation: a Prerequisite and Foundation for Sustainable Development of Mining Operations. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(3):74–78. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-74-78.

Введение

Под устойчивостью функционирования горнотехнических систем традиционно понимается обеспечение текущих общественных потребностей в изменяющихся условиях без нарушения перспектив развития будущих поколений. Вместе с тем анализ особенностей функционирования горнотехнических систем в условиях глобальных вызовов – пандемии, международных санкций, срыва устойчивых поставок и иных рисков, показал, что для безопасного и рентабельного развития самих горнотехнических систем необходимо обеспечение безубыточ-

ного их функционирования на протяжении всего периода комплексного освоения участка недр [1]. Это обеспечивается за счет формирования инновационных резервов и управления внутренними горнотехническими факторами в специфических условиях разработки природных месторождений с учетом изменения конъюнктурных и социально-экономических факторов внешней среды. Как показал анализ мирового опыта, современные тенденции развития горнорудной промышленности связаны с цифровой трансформацией горнотехнических систем, предусматривающей внедрение цифровых технологий в различные

бизнес-процессы предприятий отрасли. Сделать это возможно исключительно на базе внедрения интеллектуализации геотехнологий и цифровой трансформации горного производства [2–4].

В аспекте обеспечения устойчивости горнотехнической системы следует отметить свойство самой системы самоизменяться в ходе функционирования, трансформировать те базовые условия, на которые она была запроектирована. Действительно, в ходе функционирования горнотехнической системы неизбежно истощаются балансовые запасы месторождения, динамично изменяются в результате техногенного воздействия геологические, геомеханические, газо-, гидродинамические условия, экологическое состояние среды и экономический минерально-ресурсный потенциал.

В этих условиях обеспечить устойчивость системы в особо сложных условиях возможно исключительно путем рационализации структуры горнотехнической системы, введения дополнительных инновационных процессов, обособования их параметров с учетом закономерностей совокупного воздействия всех вышеперечисленных факторов при проектировании в условиях истощения запасов, повышенных техногенных рисков и высокой степени неопределенности исходной информации о состоянии осваиваемого участка недр. Важным условием успешной реализации этих процессов является цифровое описание горнотехнической системы на протяжении всего полного цикла комплексного освоения недр, начиная с горно-геологического изучения участка недр и заканчивая выпуском готовой товарной продукции.

Следует отметить, что отечественная индустрия добычи полезных ископаемых, созданная в период масштабной индустриализации второй половины XX в., не отвечает большим вызовам и глобальным трендам, связанным с изменением минерально-сырьевой базы и усложнением условий вовлечения природного и техногенного минерального сырья в промышленную эксплуатацию. Это определяет необходимость разработки научно-методических основ устойчивого развития горнотехнических систем на базе установления закономерностей взаимодействия природных и инновационных геотехнологических процессов в условиях интенсивного комплексного освоения недр Земли с использованием интеллектуальных роботизированных геотехнологий и горного оборудования, работающего в автономном режиме, оснащенного современными программными комплексами и цифровым описанием [5–7].

Обеспечение устойчивого развития минерально-сырьевой базы России возможно на основе выбора для каждой горнотехнической системы свойственного ей рационального сочетания геотехнологических процессов, функционирующих преимущественно в программируемом режиме их реализации при одновременном вовлечении в эксплуатацию природных и техногенных георесурсов различного качества и свойств, включая ранее некондиционные запасы [8–10].

При этом специфика функционирования горнотехнических систем и сопровождающих хозяйственных субъектов – рудников, горнодобывающих предприятий, корпораций, отраслей состоит не только в неповторяемости объектов недропользования, изменении во времени и пространстве предмета труда, крайней нестабильности и сложной прогнозируемости рынка сырьевой товарной продукции, но и в чрезвычайно высокой недостоверности исходной информации о состоянии объекта освоения

и связанных с этим повышенных рисках эксплуатации участка недр, особенно на больших глубинах [11–12].

Трансформация горного производства

Горнотехническая система горного предприятия включает процессы, относящиеся к разным технологическим укладам. В этих условиях устойчивое функционирование всей горнотехнической системы возможно обеспечить только на основе гармонизации технологических процессов в едином технологическом укладе. Это возможно на основе внедрения уже на стадии проектирования и в ходе всего жизненного цикла освоения участка недр интеллектуальной горнотехнической системы, оснащенной современным программируемым оборудованием, программными средствами и цифровизацией всех элементов системы в режимах прогноза и реального времени, которые способны обеспечить потребности общества в минерально-сырьевой товарной продукции, не поставив под угрозу будущие поколения. Этапы цифровизации горного производства в динамике представлены на рис. 1.



Рис. 1
Этапы цифровой трансформации горного производства

Fig. 1
Stages in digital transformation of mining operations

По мере совершенствования горнотранспортного оборудования и создания новых информационных систем в последние два десятилетия горное производство претерпело существенную трансформацию. Цифровизация горного производства базируется на развитии автоматизированных систем управления с постоянным увеличением количества объектов и элементов, обеспеченных средствами автономного контроля и учета.

Проблема цифровизации горного производства в ИПКОН РАН решается как в направлении цифровой трансформации горнотехнических систем на всех этапах полного цикла комплексного освоения недр, так и в создании методологии рейтинговой оценки инвестиционной привлекательности горнодобывающих компаний. Для этого в Институте при Отделе теории проектирования освоения недр создана лаборатория Интеллектуальных систем и цифровых технологий (ИС и ЦТ, руководитель канд. техн. наук Д.А. Клебанов), работающая в тесном содружестве с лабораторией Экологически сбалансированного освоения недр (ЭКОН, руководитель доц., канд. техн. наук Д.Н. Радченко) и с обособленным подразделением этой лаборатории (руководитель д-р техн. наук К.И. Струков), деятельность которого осуществляется на промплощадке шахты Центральная АО «Южуралзолото Группа компаний» в г. Пласт Челябинской области [12]. Представляется, что такое интегрирование сил академической науки и производства будет способствовать как разработке адекватных условиям освоения месторождений в России научно-методического обеспечения цифровизации

горных предприятий и отрасли в целом, так и продвижению отечественных горных компаний на мировом финансовом рынке с ростом эффективности и экологизацией технологий добычи и переработки минерального сырья. Направления цифровой трансформации горного производства, входящие в задачи деятельности лаборатории ИС и ЦТ, представлены на рис. 2.



Рис. 2
Направления цифровой трансформации горного производства в лаборатории Интеллектуальных систем и цифровых технологий ИПКОН РАН

Fig. 2
Directions for Digital Transformation of Mining Operations at the Intellectual Systems and Digital Technologies Laboratory of IPKON RAS

Многие инвесторы при принятии решений о вложениях в ту или иную компанию учитывают ее рейтинговую оценку. Рейтинг ESG основан на принципах ответственного инвестирования (Environmental (окружающая среда) + Social (социальная сфера) + Governance (корпоративное управление)), оцениваемых по глобальным критериям, единым для всех предприятий мира. Бурный рост ответственного инвестирования вынуждает российские корпорации следовать мировым тенденциям. По данным британской аудиторско-консалтинговой компании EY, 97% инвесторов сегодня так или иначе ориентируются на индекс ESG, принимая решения об инвестициях. Таким образом, по своей значимости уже в ближайшем будущем ESG может сравниться с оценкой кредитного рейтинга, одного из ключевых показателей для инвесторов.

- Основные направления работы по оценке индекса ESG:
- разработка научно-методических основ оценки индекса ESG в горнодобывающей промышленности;
 - научно-методическое сопровождение оценки параметров работы предприятий и подразделений и систематизация критериев устойчивого развития, обеспечивающих привлекательный ESG-рейтинг в свете глобальной трансформации горнодобывающей промышленности;
 - оценка рисков и текущего положения деятельности компаний в соответствии с матрицей вызовов ESG в горной промышленности;
 - систематизация позитивных факторов роста индекса ESG, раскрытие которых обеспечит существенное повышение текущего рейтинга горных компаний;
 - определение недостающих и слабых звеньев компании для повышения ESG-рейтинга;
 - разработка базовых принципов ESG для горнодобывающей компании в соответствии с текущими горнотехническими и горно-геологическими условиями разрабатываемых месторождений;
 - разработка дорожной карты в области ESG-трансформации, в соответствии с целями компании;
 - выбор количественных и качественных показателей ESG для конкретных условий освоения участков недр и

обоснование принципов поддержания приоритета развития компании.

Направления работ по цифровой трансформации полного цикла освоения недр предусматривают:

- обоснование и оптимизацию параметров роботизированных геотехнологий и конструктивных параметров систем разработки месторождений полезных ископаемых;
- разработку научных основ и обоснования основных этапов и технологий цифровой трансформации горного производства;
- разработку обоснований безопасности, новых редакций (дополнений) правил безопасности и норм проектирования цифрового горного предприятия с применением интеллектуальных геотехнологий добычи полезных ископаемых;
- разработку новых подходов к построению систем промышленной безопасности цифрового горного производства;
- обоснование этапов перехода к новым технологическим укладам разработки месторождений полезных ископаемых с применением интеллектуальных систем цифрового горного производства;
- обоснование принципов и информационных технологий работы с большими массивами данных в системе управления цифровым горным производством;
- развитие методов прогнозной аналитики для построения моделей управления горной компанией;
- обоснование подходов и алгоритмов построения цифровых моделей горных предприятий для оптимизации процессов добычи полезных ископаемых;
- разработку технических и технологических требований к бортовым программно-аппаратным комплексам нового поколения цифровой карьерной техники.

Заключение

В рамках современного горноперерабатывающего производства цифровизация предопределяет создание и функционирование единого центра управления производством, включающего диспетчеризацию открытых и подземных горных работ, оперативно-диспетчерский контроль работы подразделений добычи, обогатительной фабрики и металлургического передела. Очевидно, что в настоящее время наибольшей, а в ряде случаев полной цифровой трансформации подвержены процессы обогатительного и металлургического производства (рис. 3). Так, на обогатительных фабриках в настоящее время все основное и вспомогательное технологическое оборудование работает в автоматизированном режиме. Большая часть параметров технологических процессов оптимизируется на базе анализа получаемых данных. Дальнейшая трансформация производства видится в переходе к интеллектуальным технологиям оптимизации всей цепочки технологических процессов – от геологической разведки до управления отходами и рециклинга.

При этом за последнее десятилетие объемы формируемых данных горнотехнической системы растут по экспоненциальной зависимости, до 150 ТБ данных в год. Важно оценивать объемы и значимость всех информационных потоков технологических процессов и закономерности между технологическими процессами. Цифровизация горного производства предусматривает достижение нового, более высокого по качеству уровня не только организации технологических процессов, но и повышения качества выполняемых работ, стабилизации качества рудопотоков, прогнозирование риска развития аварийных ситуаций,



Рис. 3
Производственные процессы АО «ЮГК», характеризующиеся наибольшей долей цифровых технологий и работой оборудования в безлюдном режиме

Fig. 3
Production processes at the Uzhuralzoloto Group of Companies that are characterized with the highest share of digital technologies and unmanned operation of the equipment

прогнозный анализ производства и корректировку бизнес-моделей [13–15].

Этапы перехода к новым технологическим укладам разработки месторождений полезных ископаемых с приме-

нием интеллектуальных систем цифрового горного производства следует формировать в самостоятельных разделах проектных решений с учетом специфики перехода к интеллектуальным геотехнологиям.

На этапе бурного развития технологий и средств телекоммуникаций, высокоточной навигации, вычислительных технологий и робототехники внедрение интеллектуальных геотехнологий следует производить на всех этапах полного цикла освоения участка недр, начиная с геологической разведки и проектирования, продолжая на этапах эксплуатации горнотехнической системы и заканчивая затуханием горных работ с рекультивацией территорий.

Таким образом, цифровая трансформация горного производства является условием и основой повышения инвестиционной привлекательности проектов на разработку месторождений твердых полезных ископаемых. Ввиду увеличения объемов данных при эксплуатации горнотехнических систем принципы проектирования горных предприятий необходимо формировать с учетом требований к бортовым программно-аппаратным комплексам и формируемым системам данных, типам их хранения и сбора, параметрам физико-технических и физико-химических процессов получения минерально-сырьевых потоков. При развитии научно-методических основ устойчивого развития горнотехнических систем важно обоснование принципов создания информационных технологий работы с большими массивами данных в решении задач проектирования, эксплуатации, консервации и ликвидации горнотехнических систем. Развитие технической инфраструктуры является необходимым условием для цифровой трансформации предприятия. Более сложным этапом в трансформации компании являются перестройка и повышение уровня организации всех технологических процессов, развитие компетенций персонала с широким оповещением всех заинтересованных лиц и созданием доверия к внедрению новых цифровых технологий.

Список литературы

1. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Развитие научно-методических основ устойчивости функционирования горнотехнических систем в условиях внедрения нового технологического уклада. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020;(4):24–39.
2. Трубецкой К.Н., Рашевский В.В., Владимиров Д.Я., Клебанов А.Ф. Автоматизированные системы управления горнотранспортным оборудованием. Особенности и перспективы применения на предприятиях ОАО «Сибирская угольная энергетическая компания» (СУЭК). *Горная промышленность*. 2007;(6):12–14. Режим доступа: <https://mining-media.ru/ru/article/prombez/865-avtomatizirovannye-sistemy-upravleniya-gorno-transportn>
3. Трубецкой К.Н. (ред.) *Развитие ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения месторождений полезных ископаемых*. М.: Институт проблем комплексного освоения недр РАН; МедиаМир; 2014. 196 с.
4. Трубецкой К.Н., Пыталев И.А., Рыльников А.Г. Автоматизированные системы управления качеством рудопотоков на карьерах. *Маркшейдерский вестник*. 2013;(6):5–10.
5. Трубецкой К.Н., Кулешов А.А., Клебанов А.Ф., Владимиров Д.Я. *Современные системы управления горнотранспортными комплексами*. СПб.: Наука; 2007. 306 с.
6. Клебанов Д.А., Макеев М.А., Сиземов Д.Н. Применение автономной и дистанционно-управляемой техники на открытых горных работах. *Горная промышленность*. 2020;(6):14–16. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-14-18
7. Темкин И.О., Клебанов Д.А., Дерябин С.А., Конов И.С. Построение интеллектуальной геоинформационной системы горного предприятия с использованием методов прогнозной аналитики. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(3): 114–125. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-114-125
8. Трубецкой К.Н., Клебанов Д.А., Ясюченя С.В. Основы создания и этапы реализации роботизированных технологий открытых горных работ. *Горный журнал*. 2013;(10):67–72. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/1239/article/21028/>
9. Шестаков В.А. *Управление качеством продукции на горных предприятиях*. 2-е изд. Новочеркасск: УПЦ «Набла» ЮРГТУ (НПИ); 2001. 262 с.
10. Трубецкой К.Н. Перспективы применения роботизированной техники. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(S1):354–363.
11. Trubetskoy K.N., Iofis M.A., Klebanov A.F. Forecast of surface deformation in underground mining of coal deposits with the employment of geoinformation system (GIS) technologies. In: *Proceeding of the 10th International congress of the International society for mine surveying*. S.J.; 1997. P. 545–551.
12. Рыльников А.Г., Пыталев И.А. Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли: технические решения и технологические вызовы. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020;(1):470–481. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-470-481

13. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Струков К.И. Результаты и перспективы совместной инновационной научно-исследовательской и образовательной деятельности ИПКОН РАН и АО «Южуралзолото Группа Компаний». *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020;(1):21–36. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-21-36
14. Каплунов Д.Р., Милкин Д.А. Исследование влияния способа управления качеством минерально-сырьевых потоков на параметры горнотехнических систем комбинированной геотехнологии. В: *Комбинированная геотехнология: комплексное освоение и сохранение недр Земли: материалы науч.-практ. конф.*, г. Екатеринбург, 22–26 июня 2009 г. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова; 2009. С. 45–47.
15. Рыльников А.Г. Стабилизация качества рудной массы на карьерах с применением метода динамического программирования. *Маркшейдерский вестник*. 2013;(6):11–15.

References

1. Kaplunov D. R., Rylnikova M.V. Development of scientific and methodological foundations for the sustainability of mining systems in the context of the introduction of a new technological structure. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = News of the Tula State University. Sciences of Earth*. 2020;(4):24–39. (In Russ.)
2. Trubetskoy K.N., Rashevsky V.V., Vladimirov D.Ya., Klebanov A.F. The features and perspectives of mine transport automated control systems application for Siberian coal energy company (SUEK) *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2007;(6):12–14. (In Russ.) Available at: <https://mining-media.ru/ru/article/prombez/865-avtomatizirovannye-sistemy-upravleniya-gorno-transportn>
3. Trubetskoy K.N. (ed.) *Development of resource-saving and resource-replacing geotechnologies for integrated development of mineral deposits*. Moscow: Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources; MediaMir; 2014. 196 p. (In Russ.)
4. Trubetskoy K.N., Pytalev I.A., Rylnikov A.G. Automated control systems for quality of ore streams on pits. *Marksheiderskii vestnik = Mine Surveying Bulletin*. 2013;(6):5–10. (In Russ.)
5. Trubetskoy K.N., Kuleshov A.A., Klebanov A.F., Vladimirov D.Ya. *Modern management systems of mining transport complexes*. St. Petersburg: Nauka; 2007. 306 p. (In Russ.)
6. Klebanov D.A., Makeyev M.A., Sizemov D.N. Use of autonomous and remotely operated equipment in surface mining. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2020;(6):14–16. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-14-18
7. Temkin I.O., Klebanov D.A., Deryabin S.A., Konov I.S. Construction of intelligent geoinformation system for a mine using forecasting analytics techniques. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3):114–125 (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-114-125
8. Trubetskoy K.N., Klebanov D.A., Yasyuchenya S.V. Basis of creation and stages of realization of robotized cargo transportation systems on operating mining enterprises. *Gornyi Zhurnal*. 2013;(10):67–72. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1239/article/21028/>
9. Shestakov V.A. *Management of product quality at mining operations*. 2nd ed. Novocheboksinsk: Nabla; 2001. 262 p. (In Russ.)
10. Trubetskoy K.N. Prospects of robotic technology for future careers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013;(S1):354–363. (In Russ.)
11. Trubetskoy K.N., Iofis M.A., Klebanov A.F. Forecast of surface deformation in underground mining of coal deposits with the employment of geoinformation system (GIS) technologies. In: *Proceeding of the 10th International congress of the International congress of the International society for mine surveying*. S.J.; 1997, pp. 545–551.
12. Rylnikov A.G., Pytalev I.A. Conditions for ensuring the multifunctional use of subsoil in the interaction of different industries. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = News of the Tula State University. Sciences of Earth*. 2020;(1):470–481. (In Russ.) DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-470-481
13. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V., Strukov K.I. Results and prospects of joint innovative scientific-research and educational activities ipkonras and JSC “SGC”. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = News of the Tula State University. Sciences of Earth*. 2020;(1):21–36. (In Russ.) DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-21-36
14. Kaplunov D.R., Milkin D.A. . Studying the impact of the quality control methods of mineral resource flows on combined mining systems parameters. In: *Combined mining method: integrated development and conservation of subsoil resources; proceedings of the scientific and practical conference*, Ekaterinburg, June 22–26, 2009. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2009, pp. 45–47.
15. Rylnikov A.G. Stabilization of quality of ore mass on pits with the use of method of dynamic programming. *Marksheiderskii vestnik = Mine Surveying Bulletin*. 2013;(6):11–15. (In Russ.)

Информация об авторах

Рыльникова Марина Владимировна – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом теории проектирования освоения недр, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: rylnikova@mail.ru.

Струков Константин Иванович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация.

Радченко Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация.

Есина Екатерина Николаевна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.06.2021
 Поступила после рецензирования: 05.07.2021
 Принята к публикации: 07.07.2021

Information about the authors

Marina V. Rylnikova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: rylnikova@mail.ru.

Konstantin I. Strukov – Doctor of Technical Sciences, Leading Research Scientist, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation.

Dmitry N. Radchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Research Scientist, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation.

Ekaterina N. Esina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Research Scientist, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: esina555@list.ru.

Article info

Received: 15.06.2021
 Revised: 05.07.2021
 Accepted: 07.07.2021