ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(12-1):29-41
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 528.8, 622 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_29

ОСОБЕННОСТИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

М.В. Мелихов

Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия, e-mail: m.melikhov@ksc.ru

Аннотация: Космические и цифровые технологии находят многоцелевое применение в недропользовании при решении проблем, связанных с рациональным и безопасным освоением месторождений полезных ископаемых. Организация в условиях современного горного предприятия высокотехнологичной спутниковой системы регулярного промышленного и экологического мониторинга обеспечивает непрерывный сбор уникальных информационных продуктов с возможностью оперативной генерации разносторонних геоданных в едином виртуальном пространстве цифрового двойника. Рассмотрены особенности и перспективные направления развития техники и технологий дистанционного зондирования, а также прикладного программного обеспечения. Представлена общая концепция и принципы цифровой трансформации пространственных данных со спутников на опасном производстве. Приведена область применения космических аппаратов в задачах геоинформационного сопровождения горных работ. Описана методология многорежимных наблюдений из космоса за состоянием горнопромышленных комплексов, основанная на принципах синхронизации и комплексирования многоуровневых междисциплинарных исследований, синергии инновационных технологий автоматизированных инструментальных измерений и дистанционного контроля. Показаны теоретические и технические возможности глобальных веб-приложений и геосервисов на примере оптико-электронных и радарных съемок промышленных объектов и природоохранных территорий. Проанализирован опыт космического мониторинга горных природно-технических систем в Баренцевом Евро-Арктическом регионе России.

Ключевые слова: недропользование, природно-технические системы, промышленная и экологическая безопасность, геоинформационное сопровождение горных работ, космические и цифровые технологии, дистанционное зондирование, стандартизованные индексные геоиндикаторы, информационные ресурсы и продукты, единое цифровое пространство, базы данных.

Для цитирования: *Мелихов М. В.* Особенности геоинформационного космического мониторинга горнопромышленных природно-технических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-1. – С. 29–41. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_29.

Features of geoinformation space monitoring of mining natural-technical systems

M.V. Melikhov

Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia,
e-mail: m.melikhov@ksc.ru

© М.В. Мелихов. 2022.

Abstract: Space and digital technologies find multipurpose application in subsurface use in solving problems related to the rational and safe development of mineral deposits. The organization of a high-tech satellite system of regular industrial and environmental monitoring in the conditions of a modern mining enterprise ensures the continuous collection of unique information products with the possibility of operational generation of versatile geodata in a single virtual space of a digital twin. The article discusses the features and promising areas of development of remote sensing technology and technologies, as well as application software. The general concept and principles of digital transformation of spatial data from satellites in hazardous production are presented. The scope of application of spacecraft in the tasks of geoinformation support of mining operations is given. The methodology of multi-mode observations of the state of mining complexes from space is described, based on the principles of synchronization and integration of multi-level interdisciplinary research, synergy of innovative technologies of automated instrumental measurements and remote control. The theoretical and technical capabilities of global web-applications and services are shown on the example of optoelectronic and radar surveys of industrial facilities and nature conservation areas. The experience of space monitoring of mining natural-technical systems in the Barents Euro-Arctic region of Russia is analyzed.

Key words: subsurface use, natural-technical systems, industrial and environmental safety, geoinformation support of mining operations, space and digital technologies, remote sensing, standardized index geo-indicators, information resources and products, a single digital space, databases.

For citation: Melikhov M. V. Features of geoinformation space monitoring of mining natural-technical systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-1):29-41. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_29.

Введение

В условиях цифровизации горной промышленности [1] возросла актуальность воспроизводства геоинформационных продуктов методами инструментальных наблюдений и дистанционного контроля. На современном горном производстве разносторонние данные генерируются с помощью автоматизированных средств сбора и передачи информации в едином цифровом пространстве [2], что позволяет отслеживать и прогнозировать состояние и процессы в природно-технических комплексах. Развитие систем промышленного и экологического мониторинга за счет синергии инновационных технологий обеспечивает более высокий уровень ее функционирования и, как следствие, способствует повышению эффективности управления горным предприятием [3—4].

На глобальном рынке спутниковые системы [5] являются наиболее перспективным инструментом в изучении и создании цифрового двойника планет. Существуют разновидности группировок космических аппаратов, предназначенных для получения информации о физических, химических и биологических аспектах окружающей среды. Космическая отрасль динамично развивается по пути создания интеллектуальной метавселенной, ориентированной на виртуальное взаимодействие людей и технологий при работе с совокупностью пространственных данных в режиме ре-

ального времени. Основными преимуществами методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются: мультимасштабность и высокотехнологичность процессов, а также доступность и информативность геоданных.

Анализ мирового опыта [6—16] показывает, что внедрение космических и цифровых технологий в горном деле способствует решению следующих задач:

- архивный поиск и актуализация геоинформационных продуктов;
- подготовка площадок и надзор строительства наземной инфраструктуры;
- геолого- и геофизическая разведка;
- промышленный и экологический мониторинг;
- информирование о чрезвычайных ситуация и авариях;
- контроль рекультивации нарушенных земель.

Важнейшие направления прикладных научных исследований в этой сфере связаны с развитием новой инфраструктуры и технологий интегрированного системно-структурированного (ретроспективного, оперативного и тематического) представления и распространения геопространственной информации, а также совершенствованием механизмов формирования и управления сверхмассивными базами данных [17—20].

Современный подход к трансформации космических и цифровых технологий на горном производстве

В настоящее время в рамках космических научно-исследовательских миссий глобального мониторинга создана сеть спутников, непрерывно собирающих массив всевозможных геопространственных данных. В ключе межгосударственных инициатив реализуется внедрение пилотных проектов по оказанию информационных услуг, касающихся окружающей среды и ее безопасности. Национальные целевые космические программы устанавливают приоритетный курс развития отрасли в отдельных регионах. Международное сотрудничество направлено на взаимный доступ к спутниковым данным и их массовое применение в разных сферах деятельности человека.

В недропользовании геоинформационный космический мониторинг [21] реализуется с помощью цифровых интегрированных систем и веб-платформ (рис. 1). Данные ДЗЗ посредством прикладных сервисов и приложений генерируются в единой информационной системе, используемой при обновлении и распределении геоинформации в едином цифровом пространстве на горном производстве, а также в системы наблю-

Рис. 1. Современная модель геоинформационного космического мониторинга на горном производстве
Fig. 1. A modern model of the geoinformation space monitoring in mining

Таблица 1

Основные виды цифровых продуктов космической съемки в задачах геоинформационного сопровождения горных работ
The main types of digital products of space survey in the tasks of geoinformation support of mining operations

Наименование	*Режимы съемки КА			
	UV	V	IR	R
Фотоснимки		●		
Топо- и картографические материалы		●	●	●
Цифровые модели рельефа и наземной инфраструктуры		●		●
Тематические индексные изображения	●		●	
Пространственно-аналитические и графические числовые геоданные	●	●	●	●

Примечание: *Режимы спутниковой съемки космическими аппаратами (КА), где UV — ультрафиолетовый, V — видимый, IR — инфракрасный, R — радарный диапазоны электромагнитного спектра съемочной аппаратуры, соответственно.

дений и контроля через стационарные или мобильные технические устройства. В основе цифровой трансформации используются принципы: стандартизации и открытости геоданных, автоматизации процессов их сбора и анализа.

Глобальные спутниковые системы производят съемку в широком диапазоне электромагнитного спектра от 0,01 мкм до 1 м с полным покрытием земной поверхности. Принцип космического мониторинга заключается в регистрации различными типами съемочной аппаратуры сигналов отраженной солнечной энергии и электромагнитного излучения, отображающих фактическое состояние объектов или территории. Сбор и передача пространственных данных осуществляется непосредственно на борту космических аппаратов или наземной приемной станции через специальные датчики или ретрансляторы, соответственно. Высокая достоверность и скорость обмена геоданными обеспечивается программно-техническими средствами.

Геоинформационные ресурсы предоставляют удаленный доступ в сети интернет к пространственным данным спутниковых миссий. Материалы съемок систематизируются по уровням обработки данных и хранятся на открытых облачных серверах. Импорт продукции производится в виде сплошных панхроматических или многоспектральных изображений со встроенным единым набором метаданных. Дешифрование космоснимков выполняется визуальными и автоматизированными методами обработки данных. Экспорт результатов спутниковой съемки осуществляется в виде тематических или пространственно-аналитических цифровых геоинформационных продуктов (табл. 1).

В области ДЗЗ существует многообразие программного обеспечения: автономные или веб-приложения, математические или скомпилированные программы, открытые архивные облачные базы данных или онлайн-карты, прикладные ГИС или геопорталы, многофункциональные программные комплексы, а также универсальные интегрированные платформы. Программы имеют сложный аппаратно-вычислительный модуль работы с большими данными (Big Data) и поддержкой облачных онлайн-сервисов хранения информации (Cloud Service) на базе геопространственного искусственного интеллекта (GeoAI).

Применение цифровых платформ позволяет совершать интерактивную визуализацию (включая, многослойных изображений), автоматизированную тематическую обработку и ретроспективный статистический анализ динамических пространственных изменений, в том числе по >150 стандартизованным тематическим (аэрозольным, водным, вегетативным, геологическим и т.д.) индексным геоиндикаторам.

На основе космических и цифровых технологий производится геоинформационное сопровождение горных работ. Действующие спутниковые системы предоставляют всестороннюю информацию о состоянии горнопромышленных природно-технических систем. На горном производстве объектами космического мониторинга являются: породный массив, промплощадка, капитальные или линейные сооружения, техника и природно-охраняемые территории. Область применения космических аппаратов в решении проблем промышленного и экологического мониторинга приведена в табл. 2. Допуск к пространственным данным обеспечивается на разных уров-

Таблица 2

Приложение космических и цифровых технологий в горной промышленности в задачах управления природно-техногенными рисками
Application of space and digital technologies in the mining in the management of natural and technogenic risks

Виды аварий	***Условный уровень риска**	****Режимы съемки КА**			
		UV	**V**	**IR**	**R**
I. Аварии, связанные с нарушениями локальных технологических инструкций и нормативно-технической документации, приводящие к лишению лицензии на разработку месторождения	высокий		●		
II. Аварии, связанные с проявлениями опасных геологических процессов в горном массиве			●	●	●
III. Аварии, связанные с промышленными загрязнениями территории охраняемых природных ресурсов и атмосферы		●	●	●	
IV. Аварии, связанные с нарушением функциональной надежности или безопасностью отдельных капитальных инженерных сооружений и целостности линейных объектов	средний		●	●	●
V. Аварии, связанные с выбросами газов и возгораниями отдельных инженерных сооружений или горючих материалов		●	●	●	
VI. Аварии, связанные с неблагоприятными погодными или климатическими явлениями	низкий	●	●	●	●

Примечание: *Условный уровень риска приведен по степени потенциального ущерба (т.е. к высокому уровню риска отнесены группы I–III, которые могут привести к значительным экономическим затратам на незапланированную консервацию горных объектов или ликвидацию последствий крупных аварий, IV–V — относительно средним издержкам на ликвидацию небольших аварий и VI — незначительным плановым расходам); **Выбор режимов спутниковой съемки космическими аппаратами (КА), где UV — ультрафиолетовый, V — видимый, IR — инфракрасный, R — радарный диапазоны электромагнитного спектра съемочной аппаратуры, соответственно.

нях хранения информации (локальном, районном, региональном, национальном или международном). Материалы съемок за счет использования стандартизованного навигационного инструментария могут быть автоматически консолидированы и верифицированы в едином цифровом пространстве, формирующем совокупность хранилища информации (проектной, аналитической, экспертной, прогнозной, управленческой и т.д.), баз данных, вычислительных ресурсов и других сервисов.

Задача управления природно-техногенными рисками методами ДЗЗ сводится к виртуальному отслеживанию зон развития опасных процессов на земной поверхности посредством ретроспективного пространственно-аналитического или геостатистического анализа. При оценке потенциальных рисков актуализируется исходная картографическая информация или выполняется построение многослойных пространственных моделей, на основе которых осуществляется прогнозное моделирование явлений.

Геоинформационный анализ включает в себя визуализацию и автоматизированное районирование территории, определение конфигурации объектов во времени, а также локализацию опасных процессов посредством интерпретации данных динамических измерений на виртуально закладываемых наблюдательных полигонах или в пределах отведенных границ.

Данные со спутников позволяют оптимизировать местоположение промышленных систем мониторинга в исполнении надзора и контроля строительства наземной инфраструктуры. В процессе спутниковой съемки на регулярной основе возможно создание цифровых баз данных техногенно-нарушенных земель по группе месторождений или карт потенциальных рисков.

Методология геоинформационного космического мониторинга горнопромышленных комплексов

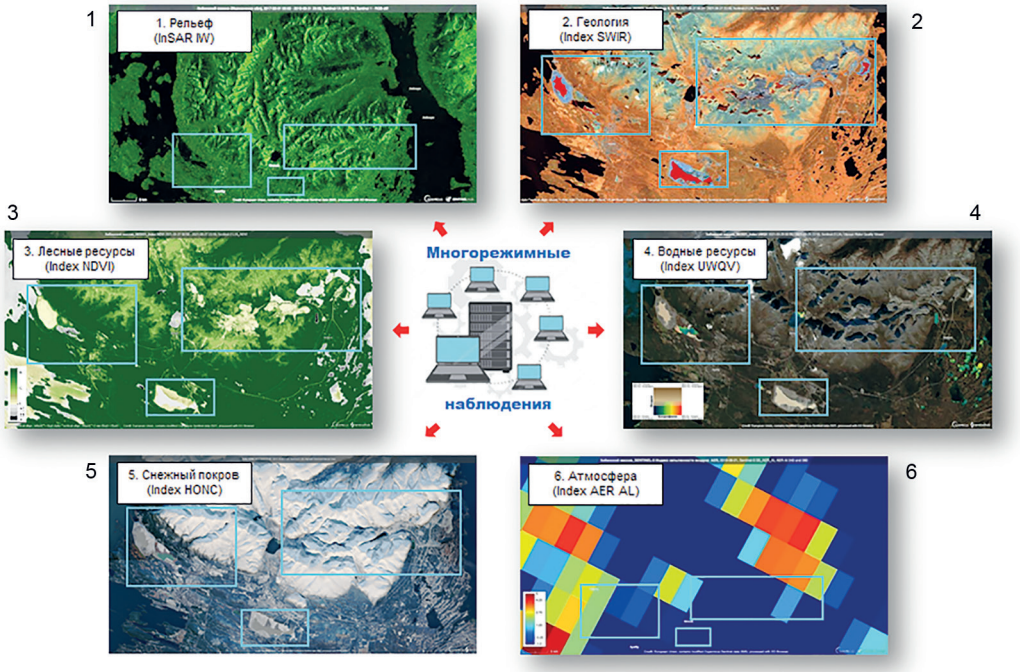
Горный институт КНЦ РАН в рамках бюджетных научно-исследовательских тем проводит фундаментальные исследования по развитию систем промышленного и экологического мониторинга с применением космических и цифровых технологий [22—29], [30, с. 265]. Методология управления рисками основывается на принципах синхронизации и комплексирования многоуровневых междисциплинарных исследований. Геоинформационный космический мониторинг реализуется посредством оптико-электронных и радарных съемок на основе ретроспективного пространственно-аналитического дешифрования мультиспектральных изображений (в том числе, по группе стандартизованных индексных геоиндикаторов) с помощью автоматизированных программных продуктов на базе искусственного интеллекта и облачных сервисов хранения информации. В качестве основных геоинформационных ресурсов и технологий используется лицензионное программное обеспечение космических агентств (в частности, веб-геопортал Госкорпорации «Роскосмос» и многофункциональные приложения Европейского космического агентства ESA), а также универсальные интегрированные ГИС-платформы. Данные спутниковых съемок сопоставляются с результатами натурных высокоточных инструментальных измерений и контроля.

Опыт геоинформационного космического мониторинга горнопромышленных комплексов в Баренцевом Евро-Арктическом регионе

Геоинформационный космический мониторинг проведен в разной степени в условиях горных региональных площадок на базе российских (Канопус) и

зарубежных (Sentinel, Landsat, CNES/Airbus, Maxar Technologies и др.) спутниковых систем. На рис. 2 показаны отдельные результаты наблюдений за состоянием горнопромышленных комплексов в районе Хибинского массива, полученные с помощью ESA Sentinel. Данный инструмент включает в себя глобальную сеть космических аппаратов и цифровые платформы нового поколения, которые в совокупности обеспечивают системно-интегрированный сбор и анализ геоинформации.

В целях обнаружения динамических смещений земной поверхности или оседания объектов наземной инфраструктуры на подрабатываемых территориях применяется метод радиолокационной интерферометрии (SAR). В основе SAR-метода используется эффект интерференции электромагнитных волн и математическая обработка последовательных когерентных амплитудно-фазовых измерений со сдвигом в пространстве. Радар с синтезированной апертурой дает возможность отслеживать вертикальные и горизонтальные смещения с точностью измерений от долей миллиметров до сантиметров в зависимости от характеристик изображений и постоянства свойств среды. Съемка ведется группировкой космических аппаратов Sentinel-1 в разных режимах с интервалом 3÷12 дней. Спутники оснащены радаром с синтезированной апертурой С-диапазона. Инструмент имеет максимальное пространственное разрешение до 5 м и полосу обзора до 400 км.



Спутниковые снимки: 1 – радарный, 2–5 – инфракрасный, 6 – ультрафиолетовый
▭ – районы местоположения горнопромышленных комплексов

Рис. 2. Многорежимный космический мониторинг группы горнопромышленных комплексов в районе Хибинского массива на базе спутниковой системы ESA Sentinel

Fig. 2. Multi-mode space monitoring of a group of mining complexes in Khibiny massif area based on the ESA Sentinel satellite system

Многоэтапная компьютерная обработка серии радарных спутниковых снимков позволяет создавать типовые информационные продукты (карты, 3D-модели, графики и др.) (рис. 2 позиция *1*), описывающие развитие опасных геологических процессов в межинтервальный период времени.

Наблюдения из космоса за состоянием природных ресурсов (рис. 2 позиции *2 — 5*) осуществляются посредством синхронной оптико-электронной съемки. Космические аппараты Sentinel-2 дают возможность получать инфракрасные изображения исследуемой территории. Они оснащены оптико-электронными мультиспектральными сенсорами для съемок с разрешением 10÷60 м в диапазонах от ближнего инфракрасного (VNIR) до коротковолновой инфракрасной зоны (SWIR) электромагнитного спектра и производят передачу информации в диапазоне широт –56° ÷ +83° с полосой обзора 290 км и интервалом повторения до 5÷10 дней.

В приложении выполняется автоматическая обработка космоснимков по ряду нормализованных или оптимизированных картографических индексов, характеризующих качественные и количественные изменения окружающей среды. Индексы вычисляются посредством комбинирования длины волн и диапазона многоканальных изображений. На их основе возможно создание новых информационных продуктов. Геопространственный анализ инфракрасных снимков по отдельным категориям стандартизованных индексов позволяет идентифицировать виды и устанавливать масштабы промышленных аварий.

Мониторинг состояния атмосферы (рис. 2 позиция *6*) проводится на основе ультрафиолетовой спутниковой съемки. В решении этой задачи применяются космические аппараты Sentinel-5, которые оснащены спектрометрической (от ультрафиолетового до коротковолнового инфракрасного диапазонов) системой. Измерения осуществляются ежесекундно на площади 2600 км в ширину и 7 км в длину с разрешением 7×7 км. По аналогии использование данного инструмента обеспечивает высокую скорость получения информации о качестве воздуха в районах деятельности горнопромышленных комплексов по группе аэрозольных индексных геоиндикаторов.

Эффективность применения космических и цифровых технологий подтверждена в различных горных природно-технических системах при решении следующих задач:

- построении актуальной картографии природных ресурсов;
- заложении виртуальных геодезических пунктов;
- создании топографической 3D-модели горного массива;
- ретроспективном анализе геопространственных изменений в природно-технических системах;
- предварительном выявлении потенциально опасных гидро- и геологических процессов;
- установлении механизмов фильтрации воды в сопряженных горно-гидротехнических комплексах;
- обнаружении процессов пыления горнопромышленных отходов;
- определении источников и масштабов промышленных аварий;
- формировании цифровых баз данных техногенно нарушенных земель и т.д.

На выборочных горнопромышленных объектах геоданные с космических аппаратов были сопоставлены с системами производственного контроля и результатами ранее выполненных полевых работ (визуальными, маркшейдерскими, геологическими, гидрогеологическими, геофизическими и т.д.). Выявленные общие закономерности показали достаточную сходимость геопространственных

данных и незаменимость данного инструмента в комплексном решении проблем в сфере промышленной и экологической безопасности при освоении месторождений полезных ископаемых на крупномасштабных арктических территориях.

Заключение

1. Международное сотрудничество и законодательство

Разработка и внедрение пилотных космических технологий осуществляется в рамках реализации национальных, в том числе международных, целевых космических программ, в связи с чем, необходимо расширение приоритетных направлений применительно к недропользованию, а также совершенствование требований промышленной безопасности и повышения уровня социально-экологической ответственности горных компаний.

2. Недропользование

Цифровизация горной отрасли посредством модернизации и интеграции в системы промышленного мониторинга космических геоинформационных ресурсов и технологий на основе инновационных средств оперативного, дистанционного и автоматизированного контроля способствует информационному обеспечению и безопасности горных работ, повышению эффективности управленческих решений и минимизации рисков природно-техногенных катастроф.

3. Космические и цифровые инновации

Цифровая трансформация и интеграция космических технологий на горном производстве в основном реализуется посредством внедрения зарубежных многофункциональных интегрированных платформ, позволяющих в режиме близко к реальному времени вести комплексные наблюдения из космоса (мониторинг техногенных изменений рельефа, водных и лесных природных ресурсов, ледников/снежного покрова, атмосферы и др.), следовательно, в условиях сложной экономико-политической ситуации необходимо развитие импортозамещающих кибербезопасных геоинформационных ресурсов и ГИС-технологий с целью более эффективного управления национальными природными или техногенными ресурсами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цифровизация* в горной промышленности. Индустрия 4.0. Материалы международного форума 24—25 октября 2019 года [Электронный ресурс]. URL: https://tu-ugmk.com/upload/NPF-journal.pdf (дата обращения: 15.09.2022 г.).

2. *Лукичев С. В.* Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № S37. — С. 7—20. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-7-20.

3. *Зиновьева О. М.*, *Кузнецов Д. С.*, *Меркулова А. М.*, *Смирнова Н. А.* Цифровизация систем управления промышленной безопасностью в горном деле // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2-1. — С. 113—123. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-113-123.

4. *Yosoon C., Baek J., Park S.* Review of GIS-based applications for mining: Planning, operation and environmental management // Applied Sciences. 2020, vol. 10, no. 7, article 2266. DOI: 10.3390/app10072266.

5. *Global* Satellite-Based Earth Observation Market Research Report: Forecast (2021—2026), MarkNtel Advisors LLP, 2021, 210 p.

6. *Loginov D. S.* Web technologies in cartographic support of geological exploration / Proceedings of the ICA. 2021, vol. 4, no. 68. DOI: 10.5194/ica-proc-4-68-2021.

7. *Girija R., Mayappan S.* Mapping of mineral resources and lithological units: a review of remote sensing techniques // International Journal of Image and Data Fusion. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 79—106. DOI: 10.1080/19479832.2019.1589585.

8. *Werner T., Bebbington A., Gregory G.* Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing // The Extractive Industries and Society. 2019, vol. 6, no. 3, pp. 993—1012. DOI: 10.1016/j.exis.2019.06.011.

9. *Пономаренко М. Р.*, *Кутепов Ю. И.*, *Волков М. А.*, *Гринюк А. П.* Космические методы в составе комплексного деформационного мониторинга земной поверхности горного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 12. — С. 103—113. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-103-113.

10. *Yang Z., Li Z., Zhu J., Wang Y.,Wu L.* Use of SAR/InSAR in mining deformation monitoring, parameter Inversion, and forward predictions: a review // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2020, vol. 8, no. 1, pp. 71—90. DOI: 10.1109/MGRS.2019.2954824.

11. *Zheng M., Deng K., Fan H., Du S.* Monitoring and analysis of surface deformation in mining area based on InSAR and GRACE // Remote Sensing. 2018, vol. 10, no. 9, article 1392. DOI: 10.3390/rs10091392.

12. *Кожаев Ж. Т., Мухамедгалиева М. А., Мустафин М. Г., Имансакипова Б. Б.* Геоинформационная система геомеханического мониторинга рудных месторождений с использованием методов космической радиолокационной интерферометрии // Горный журнал. — 2017. — № 2. — С. 39—44. DOI: 10.17580/gzh.2017.02.07.

13. *Song W., Song W., Gu H., Li F.* Progress in the remote sensing monitoring of the ecological environment in mining areas // Environmental Research and Public Health. 2020, vol. 17, no. 6, article 1846. DOI: 10.3390/ijerph17061846.

14. *McKenna P., Lechner A., Phinn S., Erskine P.* Remote sensing of mine site rehabilitation for ecological outcomes: a global systematic review // Remote Sensing. 2020, vol. 12, no. 21, article 3535. DOI: 10.3390/rs12213535.

15. *Maus V., Giljum S., Gutschlhofer J., Silva D. M., Probst M., Gass S. L. B., Luckeneder S., Lieber M., McCallum I.* A global-scale data set of mining areas // Scientific Data. 2020, vol. 7, no. 289. DOI: 10.1038/s41597-020-00624-w.

16. *Stanković R., Vulovic N., Lilic N., Obradovic I., Tošović R., Pešić-Georgiadis M. D.* WebGIS decision support system for management of abandoned mines // Energies. 2016, vol. 9, no. 567. DOI: 10.3390/en9070567.

17. *Пономаренко М. Р.*, *Кутепов Ю. И.*, *Шабаров А. Н.* Информационно-аналитическое обеспечение мониторинга состояния объектов открытых горных работ на базе технологий веб-картографии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 8. — С. 56–70. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_56.

18. *Корнилков С. В., Антонинова Н. Ю., Панжин А. А., Шубина Л. А., Исаков С. В.* О подходах к геоинформационному мониторингу с целью оценки динамики формирования горных предприятий как природно-технологических систем // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2020. — № 8. — С. 41—51. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-41-51.

19. *Ческидов В. В.*, *Маневич А. И.*, *Липина А. В.* Получение и анализ больших данных в практике мониторинга состояния горнотехнических сооружений // Горная промышленность. — 2019. — № 2(144). — С. 86—88. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-2-144-86-88.

20. *Lacroix P., Moser F., Benvenuti A., Piller T., Jensen D., Petersen I., Planque M., Ray N.* MapX: An open geospatial platform to manage, analyze and visualize data on natural resources and the environment // SoftwareX. 2019, vol. 9, pp. 77—84. DOI: 10.1016/j.softx.2019.01.002.

21. *Романов И. А.* Геоинформационный космический мониторинг // Геоинформатика. — 2015. — № 2(10). — С. 131—137. https://www.muiv.ru/vestnik/pdf/pp/ot_2015_2_131-137.pdf.

22. *Melnikov N. N.*, *Kalashnik A. I.*, *Kalashnik N. A.*, *Zaporozhets D. V.* Integrated multilevel geomonitoring of natural-and-technical objects in the mining industry // Journal of Mining Science. 2018, vol. 54, no. 4, pp. 535 — 540. DOI: 10.1134/S1062739118043977.

23. *Мельников Н. Н.*, *Калашник А. И.*, *Филатов А. В.*, *Евтюшкин А. В.* Применение радарных съемок для мониторинга карьера в условиях Арктики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — СВ 56. — С. 220 — 229.

24. *Kalashnik A. I.* Multilevel observations to monitor tailings storage facilities // International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM. 2021, vol. 21, book 1.1, pp. 325 — 330. DOI: 10.5593/sgem2021/1.1/s03.040.

25. *Калашник А. И.* Комплексные исследования и мониторинг хвостохранилищ горнопромышленных предприятий Кольского региона // Горный журнал. — 2020. — № 9. — С. 101 — 106. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.15.

26. *Мелихов М. В.* Геоинформационный космический мониторинг промышленной безопасности горно-гидротехнических природно-техногенных комплексов // Гидротехническое строительство. — 2021. — № 10. — С. 2 — 9. DOI: 10.34831/EP.2021.97.56.001.

27. *Мелихов М. В.* Космические технологии управления природно-техногенными рисками в горнопромышленных регионах / Материалы Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов «Цифровые технологии в горном деле». — Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2021. — С. 38 — 39.

28. *Мелихов М. В.* Космический радарный мониторинг горнопромышленных комплексов / Материалы Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов «Цифровые технологии в горном деле». — Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2021. — С. 39 — 40.

29. *Mesyats S., Ostapenko S.* Monitoring of environmental conditions of stockpiled ore mining and processing waste along satellite data // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2020, vol. 20, book 5.1, pp. 537 — 544. DOI: 10.5593/sgem2020/5.1/s20.068.

30. *Козырев А. А.*, *Савченко С. Н.*, *Панин В. И.*, *Семенова И. Э.*, *Рыбин В. В. и др.* Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками. — Апатиты: КНЦ РАН, 2019. — 431 с. DOI: 10.37614/978.5.91137.391.7. ГИАБ

REFERENCES

1. T*sifrovizatsiya v gornoy promyshlennosti. Industriya 4.0. Materialy mezhdunarodnogo foruma 24 — 25 oktyabrya 2019 goda* [Digitalization in the mining industry. Industry 4.0. Materials of the International forum on October 24 — 25, 2019], available at: https://tu-ugmk.com/upload/NPF-journal.pdf (accessed 15.09.2022 г.).

2. Lukichev C. V. Digital transformation of the mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. S37, pp. 7 — 20. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-7-20.

3. Zinovieva O. M., Kuznetsov D. S., Merkulova A. M., Smirnova N. A. Digitalization of industrial safety management systems in mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2-1, pp. 113 — 123. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-113-123.

4. Yosoon C., Baek J., Park S. Review of GIS-based applications for mining: Planning, operation and environmental management. *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, no. 7, article 2266. DOI: 10.3390/app10072266.

5. *Global Satellite-Based Earth Observation Market Research Report: Forecast (2021 — 2026)*, MarkNtel Advisors LLP, 2021, 210 p.

6. Loginov D. S. Web technologies in cartographic support of geological exploration. *Proceedings of the ICA*. 2021, vol. 4, no. 68. DOI: 10.5194/ica-proc-4-68-2021.

7. Girija R., Mayappan S. Mapping of mineral resources and lithological units: a review of remote sensing techniques. *International Journal of Image and Data Fusion*. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 79 — 106. DOI: 10.1080/19479832.2019.1589585.

8. Werner T., Bebbington A., Gregory G. Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing. *The Extractive Industries and Society*. 2019, vol. 6, no. 3, pp. 993 — 1012. DOI: 10.1016/j.exis.2019.06.011.

9. Ponomarenko M. R., Kutepov Yu. I., Volkov M. A., Grinuk A. P. Satellite methods within integrated land surface deformation monitoring in a mine field. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 12, pp. 103 — 113. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-103-113.

10. Yang Z., Li Z., Zhu J., Wang Y.,Wu L. Use of SAR/InSAR in mining deformation monitoring, parameter Inversion, and forward predictions: a review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2020, vol. 8, no. 1, pp. 71 — 90. DOI: 10.1109/MGRS.2019.2954824.

11. Zheng M., Deng K., Fan H., Du S. Monitoring and analysis of surface deformation in mining area based on InSAR and GRACE. *Remote Sensing*. 2018, vol. 10, no. 9, article 1392. DOI: 10.3390/rs10091392.

12. Kozhaev Zh. T., Mukhamedgalieva M. A., Mustafin M. G., Imansakipova B. B. Geoinformation system for geomechanical monitoring of ore deposits using spaceborn radar interferometry methods. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 2, pp. 39 — 44. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.02.07.

13. Song W., Song W., Gu H., Li F. Progress in the remote sensing monitoring of the ecological environment in mining areas. *Environmental Research and Public Health*. 2020, vol. 17, no. 6, article 1846. DOI: 10.3390/ijerph17061846.

14. McKenna P., Lechner A., Phinn S., Erskine P. Remote sensing of mine site rehabilitation for ecological outcomes: a global systematic review. *Remote Sensing*. 2020, vol. 12, no. 21, article 3535. DOI: 10.3390/rs12213535.

15. Maus V., Giljum S., Gutschlhofer J., Silva D. M., Probst M., Gass S. L. B., Luckeneder S., Lieber M., McCallum I. A global-scale data set of mining areas. *Scientific Data*. 2020, vol. 7, no. 289. DOI: 10.1038/s41597-020-00624-w.

16. Stanković R., Vulovic N., Lilic N., Obradovic I., Tošović R., Pešić-Georgiadis M. D. WebGIS decision support system for management of abandoned mines. *Energies*. 2016, vol. 9, no. 567. DOI: 10.3390/en9070567.

17. Ponomarenko M. R., Kutepov Yu. I., Shabarov A. N. Open pit mining monitoring support with information and analysis using web mapping technologies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 8, pp. 56–70. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_56.

18. Kornilkov S. V., Natalia I. A., Panzhin A. A., Shubina L. A., Isakov S. V. Specifying the approaches to geoinformation monitoring to assess the development dynamics of mining enterprises as natural-technological systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020, no. 8, pp. 41 — 51. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-41-51.

19. Cheskidov V. V., Manevich A. I., Lipina A. V. Obtaining and analyzing big data in the practice of monitoring the condition of mining facilities. *Russian Mining Industry*. 2019, no. 2(144), pp. 86 — 88. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-2-144-86-88.

20. Lacroix P., Moser F., Benvenuti A., Piller T., Jensen D., Petersen I., Planque M., Ray N. MapX: An open geospatial platform to manage, analyze and visualize data on natural resources and the environment. *SoftwareX*. 2019, vol. 9, pp. 77 — 84. DOI: 10.1016/j.softx.2019.01.002.

21. Romanov I. A. Geoinformation space monitoring. *Geoinformatika*. 2015, no. 2(10), pp. 131 — 137. [In Russ]. https://www.muiv.ru/vestnik/pdf/pp/ot_2015_2_131-137.pdf.

22. Melnikov N. N., Kalashnik A. I., Kalashnik N. A., Zaporozhets D. V. Integrated multilevel geomonitoring of natural-and-technical objects in the mining industry. *Journal of Mining Science*. 2018, vol. 54, no. 4, pp. 535 — 540. DOI: 10.1134/S1062739118043977.

23. Melnikov N. N., Kalashnik A. I., Filatov A. V., Yevtyushkin A. V. The use of radar surveys for monitoring a quarry in the Arctic conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, special edition 56, pp. 220 — 229. [In Russ].

24. Kalashnik A. I. Multilevel observations to monitor tailings storage facilities. *International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM*. 2021, vol. 21, book 1.1, pp. 325 — 330. DOI: 10.5593/sgem2021/1.1/s03.040.

25. Kalashnik A. I. Complex research and monitoring of tailings dumps of mining enterprises of the Kola region. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 9, pp. 101 — 106. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.15.

26. Melikhov M. V. Geoinformation space monitoring of industrial safety of mining and hydrotechnical natural and technogenic complexes. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2021, no. 10, pp. 2 — 9. [In Russ]. DOI: 10.34831/EP.2021.97.56.001.

27. Melikhov M. V. Space technologies of natural and technogenic risk management in mining regions. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s uchastiem inostrannykh spetsialistov «Tsifrovye tekhnologii v gornom dele»* [Materials of the All-Russian scientific and technical conference with the participation of foreign specialists «Digital technologies in mining»], Apatity, Izd-vo FITs KNTs RAN, 2021, pp. 38 — 39. [In Russ].

28. Melikhov M. V. Space radar monitoring of mining complexes. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s uchastiem inostrannykh spetsialistov «Tsifrovye tekhnologii v gornom dele»* [Materials of the All-Russian scientific and technical conference with the participation of foreign specialists «Digital technologies in mining»], Apatity, Izd-vo FITs KNTs RAN, 2021, pp. 39 — 40. [In Russ].

29. Mesyats S., Ostapenko S. Monitoring of environmental conditions of stockpiled ore mining and processing waste along satellite data. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2020, vol. 20, book 5.1, pp. 537 — 544. DOI: 10.5593/sgem2020/5.1/s20.068.

30. Kozyrev A. A., Savchenko S. N., Panin V. I., Semenova I. E., Rybin V. V., etc. *Geomekhanicheskie protsessy v geologicheskoy srede gornotekhnicheskikh sistem i upravlenie geodinamicheskimi riskami* [Geomechanical processes in the geological environment of mining systems and geodynamic risk management], Apatity, KNTs RAN, 2019, 431 p. DOI: 10.37614/978.5.91137.391.7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Мелихов Михаил Владимирович — канд. техн. наук,
научный сотрудник, e-mail: m.melikhov@ksc.ru,
Горный институт Кольского научного центра РАН,
ORCID ID: 0000-0001-8283-2799.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

M.V. Melikhov, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,
Mining Institute, Kola Scientific Centre
of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia,
e-mail: m.melikhov@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8283-2799.

Получена редакцией 25.03.2022; получена после рецензии 18.08.2022; принята к печати 10.11.2022.
Received by the editors 25.03.2022; received after the review 18.08.2022; accepted for printing 10.11.2022.