



Интеграция методов и моделей дистанционной обработки данных зондирования в задачах нелинейной геомеханики

В.П. Потапов¹✉, В.Н. Опарин²

¹ Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Кемеровский филиал ФИЦ ИВТ), г. Кемерово, Российская Федерация

² Институт горного дела имени Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
✉ vadimptpv@gmail.com

Резюме: Представлен методологический подход к созданию современных систем комплексного геомеханического мониторинга крупномасштабных объектов промышленного недропользования в Сибири с использованием мультимодальных и цифровых фабрик экспериментальных и теоретических данных разнородной геоинформации. Для решения задач мониторинга использованы принципы геомеханической термодинамики, позволяющие интегрально оценить как геомеханические, так и тепловые процессы на поверхности горных предприятий. Для этого разработан программно-аппаратный комплекс информационно-аналитической системы для отработки спутниковых радарных снимков, основанный на свободно распространяемом программном обеспечении. На основе проведенных расчетов разработан новый алгоритм для оценки зон оползней с применением мультиспектральных и радарных снимков. Разработанный комплекс ориентирован на вопросы геомеханической термодинамики и позволяет решать задачи оценки техногенного воздействия при добыче полезных ископаемых. Успешная верификация предложенного подхода показала его высокую эффективность. Результаты тестирования информационной системы в различных режимах функционирования иллюстрируются на примере решения важных задач в Кузбассе и Норильском горнопромышленном комплексе.

Ключевые слова: информационные системы, информационные технологии, крупномасштабные объекты недропользования, Сибирь, модели метаданных, базы геоданных, горнопромышленный район, тестирование программных продуктов, аэрокосмическая информация

Для цитирования: Потапов В.П., Опарин В.Н. Интеграция методов и моделей дистанционной обработки данных зондирования в задачах нелинейной геомеханики. *Горная промышленность*. 2023;(S1):22–26. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-22-26>

Integration of remote sensing techniques and models in nonlinear geomechanics tasks

V.P. Potapov¹✉, V.N. Oparin²

¹ Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Kemerovo Branch), Kemerovo, Russian Federation

² Mining Institute named after N.A. Chinakal, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
✉ vadimptpv@gmail.com

Abstract: The paper presents a methodological approach to creating state-of-the-art systems for integrated geomechanical monitoring of large-scale industrial mining facilities in Siberia using multimodal and digital factories of experimental and theoretical data of heterogeneous geoinformation. The monitoring tasks are solved using the principles of geomechanical thermodynamics that allow integral estimation of both geomechanical and thermal processes on the surface of mining operations. A hardware and software suite was developed for the information and analytical system to process satellite radar images, based on freely distributable software. Based on the calculations performed, a new algorithm was developed to assess landslide zones using multispectral and radar images. The developed complex is focused on the issues of geomechanical thermodynamics and makes it possible to solve the tasks of assessing the man-made impact of mining operations. Successful verification of the proposed approach has proved its high efficiency. The results of testing the information system in various operating modes are exemplified by solving important tasks at the Kuzbass and the Norilsk mining complex.

Keywords: information systems, information technologies, large-scale mining facilities, Siberia, metadata models, geodata bases, mining region, software testing, aerospace data

For citation: Potapov V.P., Oparin V.N. Integration of remote sensing techniques and models in nonlinear geomechanics tasks. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):22–26. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-22-26>



Введение

Резкое повышение добычи полезных ископаемых в последнее время привело к активизации физико-химических процессов в горном массиве [1; 2]. Появившиеся в практике новые системы геомеханического мониторинга, основанные на использовании данных дистанционного зондирования, позволили по-новому оценивать эти процессы, наблюдая как за смещениями пород в районах интенсивной добычи, так и за соответствующими явлениями, такими как подземные пожары. Например, сегодня в Кузбассе зафиксировано 26 действующих подземных пожаров, хотя в действительности их больше.

Для создания современных цифровых систем мониторинга одним из актуальных вопросов является использование новейших информационных технологий, таких как [3–13]:

1. BIG DATA – сбор и анализ данных;
2. Data Science – комплексный анализ пространственных данных;
3. цифровые двойники и цифровые фабрики – создание систем;
4. интегрированного цифрового геомеханического мониторинга;
5. ETL системы для подготовки, загрузки и обработки данных;
6. озера данных – для хранения «сырой» (необработанной) информации;
7. новые алгоритмы и методы обработки аэрокосмической информации;
8. методы искусственного интеллекта-нейронные сети, связательные и сети глубокого обучения.

Отметим, что для широкого использования перечисленных технологий требуется значительное увеличение вычислительных мощностей и переход на миникластеры с распределенной или облачной архитектурой.

Результаты исследования

Для решения задач мониторинга в своей работе мы использовали принципы геомеханической термодинамики, активно развиваемые нами и позволяющие интегрально оценить как геомеханические, так и тепловые процессы, происходящие на поверхности горных предприятий. С этой целью нами разработан программно-аппаратный комплекс информационно-аналитической системы для обработки спутниковых радарных снимков, основанный на свободно распространяемом программном обеспечении. В связи с тем что имеющееся в мире программное обеспечение достаточно дорогое и сложное, был создан простой и удобный аппарат, который могут применять пользователи, совершенно не знакомые с методами обработки спутниковой информации.

Преимуществами такого подхода являются:

- высокая масштабируемость, достигаемая за счет добавления новых узлов в вычислительный кластер без необходимости внесения изменений в применяемые алгоритмы;
- встроенная возможность работы в режиме реального времени, позволяющая применять алгоритмы потоковой обработки радарных данных;
- возможность использования вспомогательных программных решений, необходимых для организации системы, которая будет поддерживать полный цикл предметных задач.

Концептуальная архитектура системы обработки радарных данных показана на рис. 1. В настоящий момент

система может обрабатывать как радарные, так и мультиспектральные данные, что хорошо согласовывается с особенностями развиваемого нами подхода к разработке интегрированных систем цифрового геомеханического мониторинга, связанного с анализом на единой термодинамической основе всех процессов, происходящих в горном массиве, подвергаемом сильным техногенным воздействиям со стороны промышленных предприятий.

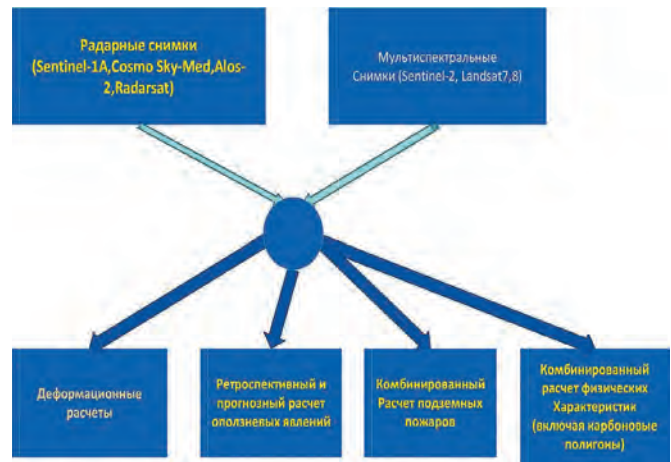


Рис. 1
Концептуальная архитектура программного комплекса обработки радарных и мультиспектральных данных

Fig. 1
Conceptual architecture of the radar and multispectral data processing software suite

Подобная схема обработки спутниковых данных для расчета смещений соответствует классическим схемам обработки такой информации, принятой в международном сообществе.

Отметим, что в ней предусмотрен мониторинг исполняемых заданий, а также просмотр результатов обработки (смещения и их скорости). В настоящее время в ней реализован стек алгоритмов обработки, включающий в себя большинство современных математических методов анализа радарных данных, и планируется его расширение за счет новых перспективных алгоритмов, как показано на рис. 2, что позволит пользователю выбирать метод расчета, который наиболее адекватен его данным.



Рис. 2
Схема алгоритмов обработки радарной информации

Fig. 2
Schematic diagram of the radar data processing algorithms



С использованием разработанного нами программно-аппаратного комплекса создана прикладная подсистема «Сейсмика и геодинамика городов, техногенных объектов страны», которая предполагает получение радарных снимков и сейсмической информации из имеющихся архивов с последующим расчетом смещений в заданном горнопромышленном регионе.

С помощью данной системы был проведен геомеханический расчет крупнейшей аварии в г. Норильске, связанной с разрывом одного из баков хранилища горючего 6 июля 2020 г. Были проанализированы и обработаны серии радарных снимков за несколько лет, результаты которых показали обусловленность аварии многолетними температурными деформациями поверхности, как показано на рис. 3.

В процессе исследований была реализована общая схема обработки данных дистанционного зондирования для оползневых явлений на основе созданного уникального программного комплекса, которая была использована для оценки произошедших в Кузбассе и Новосибирской области техногенных оползней на угольных разрезах на основе предысторий процессов.

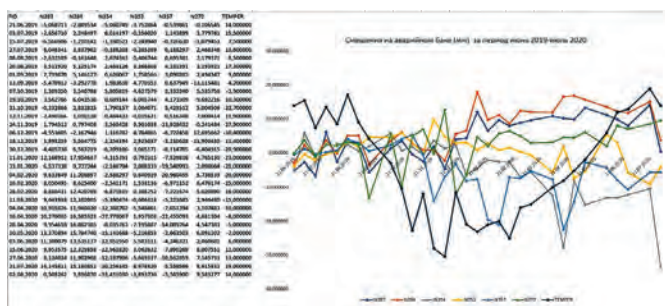


Рис. 3
Анализ смещений аварийного бака за 2019–2020 гг. с выделением изменения температуры (жирная линия)

Fig. 3
Emergency tank displacement analysis for 2019–2020, outlining the temperature variations (bold line)

Результаты расчета смещений на разрезе Кейзакский (Кузбасс) приведены на рис. 4.

Одновременно с расчетом смещений по радарным снимкам выполнен расчет полей линеаментов, для чего был разработан специализированный программный комплекс выделения линейных объектов, позволяющий строить розы-диаграммы и гистограммы полей линеаментов. Пример расчетов полей линеаментов до и после оползня на одном из угольных разрезов приведен на рис. 4.



Рис. 4
Анализ смещений до и после оползня 2019–2020 гг. для угольного разреза

Fig. 4
Analysis of displacements before and after the 2019–2020 landslides for a coal strip mine

Нами также проводились оценки оползневых явлений для Российских железных дорог в районе г. Красноярск.

На основе проведенных расчетов был разработан новый алгоритм для оценки зон оползней с применением мульти-спектральных и радарных снимков.

В связи с тем что подземные пожары представляют существенную опасность, особенно при подземной добыче угля, на основе разрабатываемых методов и геомеханической термодинамики была выполнена работа по оценке влияния зон подземных пожаров на смещение поверхности в их окрестности. В качестве опытного объекта использовалось поле шахты Коксовая, находящейся в черте г. Прокопьевска в Кузбассе.

В работе оценивалась возможность применения данных Landsat 8 для обнаружения и анализа температурных аномалий на территории шахты. В качестве инструмента извлечения и обработки спутниковой информации использовалась система Google Earth Enging. В этой системе спутниковые данные представлены по коллекциям, в том числе имеется коллекция атмосферно-скорректированных данных Landsat 8 (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat>). Данные тепловых каналов Landsat 8 имеют разрешение 100 м. Однако в коллекции Google Earth Enging они представлены в пересчете на разрешение в 30 м, что удобно для изучения достаточно небольших по площади техногенных объектов.

Для определения температуры T_{LST} по данным Landsat 8 использовался наиболее распространённый метод, описание которого можно найти в работах [14; 15], в которых были использованы архивы за 2015–2020 гг. (Landsat-8) и построены гистограмма и карты средних температур (рис. 5). На этой основе были выделены аномальные зоны, оценена годовая динамика и построены соответствующие карты по годам.

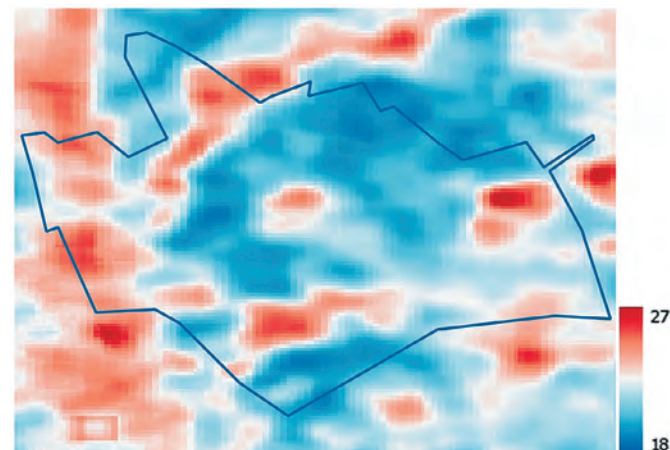


Рис. 5
Карта средних температур и зоны аномалий

Fig. 5
Map of average temperatures and zone of anomalies

Синхронно с этими данными на основе программно-аппаратного комплекса за это же время оценивались смещения поверхности в районе подземного пожара на основе длинных временных серий радарных снимков. Строились карты смещений и их гистограммы по годам.

Затем были построены годовые комбинированные карты температурных зон и особых зон смещений, рассчитанные по методу HOT SPOTS [16; 17], которые показали высокую сходимость зон смещений и зон с повышенной температурой (рис. 6).

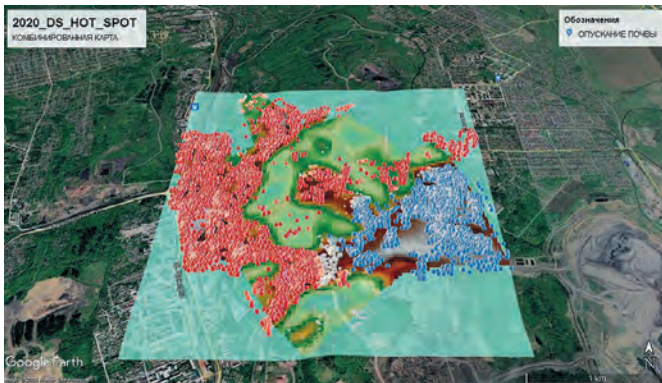


Рис. 6
Комбинированная карта зон смещений и температурных аномалий, полученная по методу «горячих точек»

Fig. 6
Combined map of displacement zones and temperature anomalies obtained using the Hot Spot Method

Комбинация радарных и мультиспектральных снимков также используется нами для оценки степени техногенного воздействия и оценки динамики почв в районах с высокими техногенными нагрузками.

Заключение

Разработанный нами подход комплексной обработки мультимодальной спутниковой информации, реализованный в виде специализированного программно-аппаратного комплекса, ориентирован на задачи геомеханической термодинамики и позволяет решать ряд проблем, связанных с оценкой техногенного воздействия при добыче полезных ископаемых. Успешная верификация предложенного подхода на реальных горнопромышленных объектах (угольных предприятиях) показала его высокую эффективность для практических приложений.

Список литературы

1. Мельников Н.Н. (ред.) *Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2012. 625 с.
2. Мельников Н.Н. (ред.) *Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2018. Т. 1. 549 с.; 2019. Т. 2. 543 с.
3. Опарин В.Н., Потапов В.П., Киряева Т.А., Юшкин В.Ф. К проблеме разработки методов и геоинформационных средств комплексной оценки влияния нелинейных деформационно-волновых процессов, индуцированных сейсмическими воздействиями, на геомеханическое состояние бортов карьеров и газодинамическую активность угольных шахт Кузбасса. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(8):5–39. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-5-39>
4. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Усольцева О.М., Мулев С.Н., Юшкин В.Ф. и др. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Ч. I: Формулировка и обоснование задачи исследований. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(1):5–25. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-01-0-5-25>
5. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Юшкин В.Ф., Киряева Т.А. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Ч. II: Динамико-кинематические характеристики волн маятникового типа в напряженных геосредах и сейсмоэмиссионные процессы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(11):5–26. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-0-5-26>
6. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Юшкин В.Ф., Киряева Т.А. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Ч. III: Перспективные системы контроля деформационно-волновых процессов в подземных и наземных условиях ведения горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(12):5–29. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-05-29>
7. Опарин В.Н. Волны маятникового типа и «геомеханическая температура». В кн.: *Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: труды 2-й Российско-Китайской Междунар. конф. Новосибирск, 2–5 июля 2012 г.* Новосибирск: ИГД СО РАН; 2012. С. 169–172.
8. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed media. Part I. *Journal of Mining Science*. 2012;48(2):203–222. <https://doi.org/10.1134/S1062739148020013>
9. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed media. Part II. *Journal of Mining Science*. 2013;49(2):175–209. <https://doi.org/10.1134/S1062739149020019>
10. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed media. Part III. *Journal of Mining Science*. 2014;50(4):623–645. <https://doi.org/10.1134/S1062739114040024>
11. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed media. Part IV. *Journal of Mining Science*. 2016;52(1):1–35. <https://doi.org/10.1134/S106273911601009X>
12. Логов А.Б., Опарин В.Н., Потапов В.П., Счастливец Е.Л., Юкина Н.И. Энтропийный метод анализа состава техногенных вод горнодобывающего региона. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2015;(1):168–179.
13. Новопашин М.Д. (ред.) *Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2008. 449 с.
14. Jimenez-Munoz J.C., Sobrino J.A., Skokovic D., Mattar C., Cristobal J. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014;11(10):1840–1843. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>
15. Parastatidis D., Mitraka Z., Chrysoulakis N., Abrams M. Online global land surface temperature estimation from Landsat. *Remote Sensing*. 2017;9(12):1208. <https://doi.org/10.3390/rs9121208>
16. Потапов В.П., Опарин В.Н., Миков Л.С., Попов С.Е. Развитие и применение современных информационных технологий в решении задач нелинейной геомеханики. Часть I: Спутниковые данные дистанционного зондирования земли и метод линейного анализа деформационно-волновых процессов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(3):157–176. <https://doi.org/10.15372/FTPRP120220316>
17. Потапов В.П., Опарин В.Н., Миков Л.С., Попов С.Е. Развитие и применение современных информационных технологий в реше-



нии задач нелинейной геомеханики. Часть II: Новые методы, модели метаданных, базы геоданных и базовые слои электронных карт для типового геопортала горнопромышленных регионов Сибири. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(4):125–143. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220413>

References

1. Melnikov N.N. (ed.) *Destruction of Earth crust and self-organization processes within areas of strong anthropogenic impact*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2012. 625 p. (In Russ.)
2. Melnikov N.N. (ed.) *Geomechanical fields and processes: experimental and analytical studies into formation and development of focal zones of catastrophic events in mining and natural systems*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2018. Vol. 1. 549 p.; 2019. Vol. 2. 543 p.
3. Oparin V.N., Potapov V.P., Kiryaeva T.A., Yushkin V.F. Development of methods and means for integrated geo-information-based analysis of influence exerted by nonlinear deformation and wave processes induced by seismic forces on geomechanical behavior of pit walls and on gas-dynamic activity in coal mines in Kuzbass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(8):5–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-5-39>
4. Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Usoltseva O.M., Mulev S.N., Yushkin V.F. et al. AN Experimental and theoretical framework of nonlinear geotomography. Part I: Research problem statement and justification. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(1):5–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-01-0-5-25>
5. Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Yushkin V.F., Kiryaeva T.A. Experimental and theoretical framework of nonlinear geotomography. Part II: Dynamic and kinematic characteristics of pendulum waves in high-stress geomechanics and processes of seismic emission. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(11):5–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-0-5-26>
6. Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Yushkin V.F., Kiryaeva T.A. Experimental and theoretical framework of nonlinear tomography. Part III: Promising systems to control deformation and wave processes in surface and underground mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(12):5–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-05-29>
7. Oparin V.N. Pendulum-type waves and "geomechanical temperature". In: *Non-linear geomechanical and geodynamic processes in mining of deep-lying mineral deposits: Proceedings of the 2nd Russian-Chinese scientific conference, Novosibirsk, July 2–5, 2012*. Novosibirsk: Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2012, pp. 169–172. (In Russ.)
8. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed media. Part I. *Journal of Mining Science*. 2012;48(2):203–222. <https://doi.org/10.1134/S1062739148020013>
9. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed media. Part II. *Journal of Mining Science*. 2013;49(2):175–209. <https://doi.org/10.1134/S1062739149020019>
10. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed media. Part III. *Journal of Mining Science*. 2014;50(4):623–645. <https://doi.org/10.1134/S1062739114040024>
11. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed media. Part IV. *Journal of Mining Science*. 2016;52(1):1–35. <https://doi.org/10.1134/S106273911601009X>
12. Logov A.B., Potapov V.P., Schastliltsev E.L., Yukina N.I., Oparin V.N. Entropy analysis of process wastewater composition in mineral mining region. *Journal of Mining Science*. 2015;51(1):186–196. <https://doi.org/10.1134/S1062739115010251>
13. Novopashin M.D. (ed.) *Present-day geodynamics of the upper lithosphere rock masses: origins, parameters, impact on mining facilities*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2008. 449 p. (In Russ.)
14. Jimenez-Munoz J.C., Sobrino J.A., Skokovic D., Mattar C., Cristobal J., Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014;11(10):1840–1843. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>
15. Parastatidis D., Mitraka Z., Chrysoulakis N., Abrams M. Online global land surface temperature estimation from Landsat. *Remote Sensing*. 2017;9(12):1208. <https://doi.org/10.3390/rs9121208>
16. Potapov V.P., Oparin V.N., Mikov L.S., Popov S.E. Information technologies in problems of nonlinear geomechanics. Part I: Earth remote sensing data and lineament analysis of deformation wave processes. *Fiziko-texhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2022;(3):157–176. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220316>
17. Potapov V.P., Oparin V.N., Mikov L.S., Popov S.E. Information technologies in problems of nonlinear geomechanics. Part II: New methods, metadata models, geodata bases and base layers of electronic charts for a typical geoportals of mining regions in Siberia. *Fiziko-texhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2022;(4):125–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220413>

Информация об авторах

Потапов Вадим Петрович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Кемеровский филиал ФИЦ ИВТ), г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: vadimptpv@gmail.com

Опарин Виктор Николаевич – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, Институт горного дела имени Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.02.2023

Поступила после рецензирования: 01.03.2023

Принята к публикации: 02.03.2023

Information about the authors

Vadim P. Potapov – Dr. Sci. (Eng.), Chief Research Associate, Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Kemerovo Branch), Kemerovo, Russian Federation; e-mail: vadimptpv@gmail.com

Victor N. Oparin – Corresponding Member of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Mining Institute named after N.A. Chinakal, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

Article info

Received: 12.02.2023

Revised: 01.03.2023

Accepted: 02.03.2023