

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ СКЛАДИРОВАНИЯ ОТХОДОВ УГЛЕБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Г.Б. Поспехов, В.Н. Кондакова, Н.А. Кутепова
Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Рассмотрены основные положения методологии мониторинга состояния объектов складирования отходов углеобогащения, как одного из основных видов отходов перерабатывающей промышленности. Показано разнообразие формирующихся при углеобогащении отходов, являющихся специфическими техногенными грунтами и определяющими технологию их размещения в отвалах. Обоснованы структура мониторинга и подходы к его организации в зависимости от принятой на предприятии схемы складирования отходов.

Ключевые слова: угледобыча, отходы углеобогащения, складирование отходов, отвалообразование, кек, шлам, комплексный мониторинг, эксплуатационный контроль, деформационный мониторинг, гидрогеомеханический мониторинг, инженерно-геологические исследования.

JUSTIFICATION OF THE METHODOLOGY FOR MONITORING OF THE STATE OF COAL PROCESSING WASTE STORAGE FACILITIES

G.B. Posphehov, V.N. Kondakova, N.A. Kutepova
St Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: Coal processing waste is one of the main type of processing industry waste due to its extensive volumes. The crucial aspects of the methodology for monitoring the state of coal processing waste storage facilities are considered. The variety of formed types of waste is shown and how its properties are significant for choosing the scheme of storage. The structure of monitoring is justified as well as main principles of monitoring organization, depending on adopted on the enterprise waste storage scheme.

Keywords: coal mining, coal processing waste, waste storage, dumping, coal slurry, sludge, integrated monitoring, operational control, deformational monitoring, hydrogeomechanical monitoring, geotechnical investigation.

Горнодобывающая промышленность является самым крупным источником всех видов отходов. Отходы горнодобывающего сектора подразделяются на отходы добычи, которых к настоящему времени на территории России накоплено более 3 млрд т, и отходы переработки полезного ископаемого, включающие свыше 0,5 млрд т хвостов обогащения руд, около 60 млн т металлических шлаков, более 50 млрд т шлаков и шламов ТЭС, десятки млн нефтяных шламов, около 10 млн т фосфогипса и фторогипса [1, 2]. Среди горнопромышленных отходов выделяются отходы обогащения угля, проблема накопления которых наиболее масштабна: на протяжении последних 10 лет наблюдается тенденция ежегодного увеличения объёмов углеобогащения на 10 %, к настоящему году объёмы углеобогащения превышают 200 млн т в год, при этом при обогащении 1 т угля производится 0,15–0,35 т отходов [3]. Отходы горнодобывающей промышленности, где осуществляется углеобогащение, включают в себя пустую породу, угольные частицы, шламы и кеки. Отходы могут быть складированы в отвалах, в смесях или отдельно, что определяет деформационное поведение техногенных массивов, а также возможность и экономическую целесообразность последующей переработки отходов.

В пределах отвальных сооружений углеобогажительных предприятий, которые занимают тысячи гектар и достигают высоты 150 м, в процессе размещения отходов могут возникать опасные гравитационные горно-геологические процессы и явления [4, 5], возникновение и развитие, которых значительно осложняют ведение горных работ, оказывают негативное воздействие на окружающую природную среду и ведут к экономическим издержкам. Поэтому предупреждение возникновения неблагоприятных геологических процессов и явлений — неотъемлемая часть ведения горных работ.

Основной метод решения данной проблемы заключается в организации системы комплексного мониторинга объектов складирования отходов углеобогащения с целью обеспечения непрерывного контроля состояния и свойств техногенного массива и его основания, оценки интенсивности протекающих процессов и предупреждения их неблагоприятного развития. Своевременно полученные в достаточном количестве и качестве данные мониторинга позволяют вносить оперативные изменения в схему складирования и процесс отсыпки, реализовывать мероприятия по предотвращению возникновения неблагоприятных геологических процессов и явлений, то есть обеспечивать контроль за со-

стоянием массива [6, 7]. Эффективность такого мониторинга обеспечивается путём применения всех доступных методов мониторинга, выбранных в соответствии с особенностями объекта [8, 9].

Актуальность данной темы обусловлена отсутствием в нормативных документах, действующих на территории России, регламентированной методики по организации системы комплексного мониторинга для отвальных сооружений, характеризующихся сложными конструктивными особенностями [10]. Например, если ранее предпочитали складировать отходы в смесях, то в настоящее время, чаще всего, используется схема формирования карт, которые заполняются кеком. В таких случаях наблюдается различное деформационное поведение складированного материала и, следовательно, возникают сложности в прогнозировании поведения всего массива, особенно при дальнейшем наращивании его высоты. Однако на подобных объектах, как правило, мониторинг осуществляется без учета структуры техногенного массива и не отражает в достаточной степени его реальное состояние.

Цель работы: обоснование методологии мониторинга состояния объектов складирования отходов углеобогачительных предприятий.

Материалы и методы

Отходы обогатительной фабрики представлены горной породой различного гранулометрического состава, кеком фильтр-прессового отделения (наиболее мелкая необогащаемая фракция шлама), шлаком с бункеров сушки и шламом очистки хвостохранилища. Отходы, отгружаемые в отвал, по литологическому составу являются, в основном, песчаниками, алевролитами и аргиллитами. Отходы обогащения вывозятся на породный отвал, который отсыпается ярусами. Высота первого яруса 30 м, второго – 15 м, планируется формирование третьего и последующих ярусов высотой 15 м.

Далее на основании проведенных исследований была обоснована актуальность создания системы комплексного мониторинга состояния массивов техногенных грунтов угольных предприятий.

Результаты

На основе анализа складирования отходов углеобогащения предлагается система производства работ в рамках мониторинга состояния объектов складирования отходов углеобогащения (рис. 1).

В соответствии с приведенной выше схемой, направления мониторинга, принципиально важные для обеспечения безопасной эксплуатации:

1. Доизучение инженерно-геологических и гидрогеологических условий.
2. Контроль за соблюдением схемы отвалообразования и состояния отвала.
3. Гидрогеомеханический мониторинг.
4. Деформационный мониторинг.

Обсуждение

Основы методологии мониторинга состояния отвальных сооружений углеобогачительных предприятий выражается следующими положениями.

1. Основными задачами мониторинга, выполняемой в рамках решения гидрогеомеханических задач, является:

- ✧ установление закономерностей развития геомеханических процессов;
- ✧ изучение природных и техногенных факторов, определяющих условия развития негативных экзогенных процессов;
- ✧ определение вида и характера проявления возможных деформационных процессов, приводящих к аварийным ситуациям.

Определение перечисленных показателей позволяет прогнозировать вероятные изменения, управлять состоянием



Рис. 1. Схема производства работ в рамках мониторинга состояния объектов складирования отходов углеобогащения / Fig. 1. Scheme of organization of monitoring on the coal waste dumps.

массива, а, следовательно, предотвращать негативные последствия возникающих инженерно-геологических процессов и явлений.

2. В случае мониторинга отвалов углеобогащательного предприятия натурные мониторинговые исследования являются приоритетными. Режимные наблюдения необходимы вследствие большого числа факторов влияния и значительной изменчивости параметров грунтов в пространственных направлениях. Гидрогеологические, геофизические, инженерно-геологические исследования должны представлять собой наблюдательную сеть и корректироваться в зависимости от этапа горнотехнических работ. При этом, лабораторные методы позволяют моделировать возможные деформации при заданных нагрузках, что необходимо для расчетов зависимостей и корректировок горнотехнических работ.

3. Конструктивные особенности отвалов углеобогащения, а именно создание карт, заполняемых тонкодисперсным материалом, обладающим специфическими свойствами, в значительной степени определяют параметры массива и, в частности, параметры устойчивости. Следовательно, необходимо осуществлять контроль состояния не только откосов, но всего массива. Кроме того, техногенные грунты характеризуются изменением свойств во времени, фракционированием и гравитационным уплотнением, что приводит к формированию различающихся по физико-механическим свойствам зон. Протекание сложных геомеханических процессов в отвалах отходов углеобогащения и их масштабность также доказывает необходимость создания расширенной сети мониторинга.

4. Деформационное поведение массива, сложенного отходами углеобогащения, определяется группой факторов, в числе которых генезис грунтов, фазовый состав и физическое состояние, наличие и вид структурных связей, параметры прочности, а также возможные и наблюдаемые процессы. В связи с наличием большого числа влияющих на систему факторов, деформационное поведение является индивидуальной характеристикой породы, что определяет необходимость проведения инженерно-геологических исследований для локальных объектов. С течением времени соотношение и характер влияния каждого из факторов может изменяться, что приводит к изменению состояния массива. Разработка модели деформационного поведения грунтов позволяет обосновать программу и методику мониторинговых исследований, подходящую для определенного типа деформационного поведения (структурные, фильтрационные и пластические деформации) [15].

5. Общепринятая система мониторинга геометрических параметров массива с периодичностью 2 раза в год (в случае, если скорости горизонтальных смещений менее 2 мм/сут), не может обеспечить своевременное обнаружение опасной ситуации, а также комплексную оценку, так как измерения ведутся только в пределах контролируемых участков. В связи с этим, для обеспечения оперативности контроля состояния отвалов, в теле которых наблюдаются горизонтальные и вертикальные деформации, а также для повышения эффективности мониторинга, необходимо модернизировать систему геодезического мониторинга в соответствии с доступными современными технологиями [21]. Определение глубинных послойных деформаций в массиве и его основании обеспечивается посредством устройства стационарных инклинометров, устанавливаемых в наблюдательные скважины, данные измерения которых могут передаваться в реальном времени на компьютер специалистов, ответственных за мониторинг. Кроме того, эффективным методом мониторинга состояния поверхности отвала является съемка с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Оборудование позволяет построить топографический план объекта, 3D модель, профили откосов на любом участке, а также измерить объем складываемого материала и оценить ёмкость сооружения.

Выводы

1. В данной работе рассмотрена методология мониторинга, актуальная для отвалов углеобогащательного предприятия, в пределах которых могут размещаться различные виды отходов отдельно или в смесях.

2. Комплексный мониторинг состояния объектов складирования отходов углеобогащения позволяет контролировать состояние массива с любой периодичностью за счет постоянного уточнения и дополнения материалов, полученных с этапа производства инженерных изысканий и начала формирования сооружения.

3. При выявлении факторов, оказывающих негативное влияние на состояние массива в процессе мониторинга объектов складирования отходов углеобогащения, может производиться корректировка схемы отвалообразования или мероприятия, повышающие устойчивость природно-технической системы.

4. Для каждого этапа развития отвала, при наращивании его высоты, рекомендуется разрабатывать отдельные документы, в которых регламентируются количественные и качественные характеристики критериев безопасности, а также, при необходимости, корректируется система управления состоянием отвала. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. ТЭК России - 2019. Статистический сборник. // Аналитический центр при правительстве Российской Федерации URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/17267.pdf> (дата обращения: 28.02.2022).
2. Matveeva V. A., Isakov A. E. The reduction of negative impact on environment in the area of coal processing enterprises // Innovation-based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects in 2019. - 2019. - №1. - С. 431-436.
3. Николаев, Е. Углепром консолидируют в Кузбассе / Е. Николаев. - Текст : электронный // Бизнес-портал Кузбасса : [сайт]. - URL: <https://www.avant-partner.ru/partner/7627.html> (дата обращения: 27.07.2022).
4. Kutepov Yu.I., Kutepova N.A., Kutepov Yu.Yi., Vasileva A.D., Mukhina A.S., Smirnov R.D. Engineering-geological and geoecological aspects of formation of dry dumps on hydrodumps // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2021. - № 938. P. 012007. DOI:10.1088/1755-1315/938/1/012007

5. Усиков В. И., Липина Л. Н., Александров А. В., Корнеева С. И. Оценка влияния отходов горного производства на окружающую среду с применением ГИС технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2019. - № 12. - С. 114-126. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-114-126.
6. Belova M., Iakovleva E., Popov A. Mining and environmental monitoring at open-pit mineral deposits // Journal of Ecological Engineering. - 2019. - № 20(5). P. 172-178. DOI: 10.12911/22998993/105438
7. Carlaa T., Intrierib E., Farinab P., Casagli N. A new method to identify impending failure in rock slopes // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 2017. - № 93(C). P. 76-81. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.01.015
8. Гальперин А. М., Семенова Е. А. Прогноз геомеханических процессов на горных предприятиях на основе теории консолидации породных массивов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. - 2016. - № 2. С. 111-120
9. Safiullin R.N., Afanasyev A.S., Reznichenko V.V. The Concept of Development of Monitoring Systems and Management of Intelligent Technical Complexes // Journal of Mining Institute. - 2019. - №237. P. 237-322. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.322
10. Протосеня А.Г., Кутепов Ю.Ю. Прогноз устойчивости гидроотвалов на подрабатываемых подземными горными работами территориях // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2019. - № 3. С. 97-112. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-97-112
11. Kondakova V.N., Pankratova K.V., Pomortseva A.A., Pospelov G.B. Analysis of the problem of classification of mining wastes // Engineering and Mining Geophysics 2020. - 2020. P.1 - 8. DOI: 10.3997/2214-4609.202051139
12. Лычко Ю.М. Использование промышленных отходов для устройства оснований зданий и сооружений. - М.: ВНИИИС, 1982
13. Glushkov D. O., Lyrschikov S. Yu. Shevryev S. A. Yashutina O. S.. Rheological Properties of Coal Water Slurries Containing Petrochemicals // Thermal science. - 2019. - №. 23, pp. 2939-2949. DOI: 10.2298/TSC1180422191G
14. Абелев М.Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на водонасыщенных грунтах. М.: Стройиздат, 1983. 248 с.
15. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А. Методология инженерно-геологического изучения гидрогеомеханических процессов в техногенно нарушенных массивах при разработке МПИ // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2014. С. 123-131.
16. Черемихина А.П. Оценка закономерностей изменения инженерно-геологических условий устойчивости гидроотвалов вскрышных пород в зависимости от этапа эксплуатации: дис. канд. техн. наук: 25.00.16. - СПб., 2016. - 200 с.
17. Wasilewski S. Monitoring the Thermal and Gaseous Activity of Coal Waste Dumps // Environmental Earth Science. - 2020. - № 79, P. 474. DOI: 10.1007/s12665-020-09229-3
18. Wei L., Zhang Y., Zhao Z., Zhong X., Liu S., Mao Y. and Li J.. Analysis of Mining Waste Dump Site Stability Based on Multiple Remote Sensing Technologies // Remote Sensing. - 2018. - № 10. P. 2025. DOI:10.3390/rs10122025
19. Tabish R., Yang Z., Wu L., Xu Z., Cao Z., Zheng K. and Zhang Y. Predicting the Settlement of Mine Waste Dump Using Multi-Source Remote Sensing and a Secondary Consolidation Model // Frontiers in Environmental Science. - 2022. - № 10. P.885346. DOI: 10.3389/fenvs.2022.885346
20. Геодезические, картографические инструкции, нормы и правила. "Инструкция по развитию съёмочного обоснования и съёмке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS" от 01.03.2002 № 3-пр. // Федеральная служба геодезии и картографии России. - 2002 г. - Ст. ГКИНП (ОНТА)-02-262-02
21. Klappstein B., Bonci G., Maston W. Implementation of Real Time Geotechnical Monitoring at an Open Pit Mountain Coal Mine in Western Canada // Mining Revue. - 2014. - № 20 (3), P. 2-14.

REFERENCES

1. Fuel and Energy Complex of Russia - 2019. Statistical compendium. // Analytical Center under the Government of the Russian Federation URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/17267.pdf> (date of access: 02/28/2022). (in Russian)
2. Matveeva V. A., Isakov A. E. The reduction of negative impact on environment in the area of coal processing enterprises // Innovation-based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects in 2019. - 2019. - №1. - С. 431-436.
3. Nikolaev, E. Coal industry is consolidated in Kuzbass / E. Nikolaev. - Text: electronic // Kuzbass Business Portal: [website]. - URL: <https://www.avant-partner.ru/partner/7627.html> (date of access: 07/27/2022).).
4. Kutepov Yu.I., Kutepova N.A., Kutepov Yu.Yi., Vasileva A.D., Mukhina A.S., Smirnov R.D. Engineering-geological and geoeological aspects of formation of dry dumps on hydrodumps // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2021. - № 938. P. 012007. DOI:10.1088/1755-1315/938/1/012007
5. Usikov V. I., Lipina L. N., Aleksandrov A. V., Korneeva S. I. Assessment of the impact of mining waste on the environment using GIS technologies // Mining Information and Analytical Bulletin. - 2019. - № 12. - P. 114-126. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-114-126 (in Russian)
6. Belova M., Iakovleva E., Popov A. Mining and environmental monitoring at open-pit mineral deposits // Journal of Ecological Engineering. - 2019. - № 20(5). P. 172-178. DOI: 10.12911/22998993/105438
7. Carlaa T., Intrierib E., Farinab P., Casagli N. A new method to identify impending failure in rock slopes // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 2017. - № 93(C). P. 76-81. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.01.015
8. Galperin A. M., Semenova E. A. Forecast of geomechanical processes at mining enterprises based on the theory of consolidation of rock masses // Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology. - 2016. - №. 2. P. 111-120 (in Russian)
9. Safiullin R.N., Afanasyev A.S., Reznichenko V.V. The Concept of Development of Monitoring Systems and Management of Intelligent Technical Complexes // Journal of Mining Institute. - 2019. - №237. P. 237-322. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.322
10. Protosenya A.G., Kutepov Yu.Yu. Forecast of the stability of hydraulic dumps in areas undermined by underground mining // Mining Information and Analytical Bulletin. - 2019. - №. 3. P. 97-112. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-97-112 (in Russian)
11. Kondakova V.N., Pankratova K.V., Pomortseva A.A., Pospelov G.B. Analysis of the problem of classification of mining wastes // Engineering and Mining Geophysics. - 2020. P.1 - 8. DOI: 10.3997/2214-4609.202051139
12. Lychko Yu.M. The use of industrial waste for the construction of foundations for buildings and structures. - М.: VNIIS, 1982 (in Russian)

13. Glushkov D. O., Lyrschikov S. Yu. Shevyrev S. A. Yashutina O. S.. Rheological Properties of Coal Water Slurries Containing Petrochemicals // Thermal science. - 2019. - №. 23, pp. 2939-2949. DOI: 10.2298/TSC1180422191G
14. Abelev M.Yu. Construction of industrial and civil structures on water-saturated soils. M.: Stroyizdat, 1983. 248 p. (in Russian)
15. Kutepov Yu.I., Kutepova N.A. Methodology of engineering-geological study of hydrogeomechanical processes in technogenically disturbed massifs during the development of mining enterprises // Mining Information and Analytical Bulletin. - 2014. P. 123-131. (in Russian)
16. Cheremikhina A.P. Evaluation of patterns of change in engineering-geological conditions for the stability of overburden hydraulic dumps depending on the stage of operation: PhD Thesis: 25.00.16. - St. Petersburg, 2016. - 200 p. (in Russian)
17. Wasilewski S. Monitoring the Thermal and Gaseous Activity of Coal Waste Dumps // Environmental Earth Science. - 2020. - № 79, P. 474. DOI: 10.1007/s12665-020-09229-3
18. Wei L., Zhang Y., Zhao Z., Zhong X., Liu S., Mao Y. and Li J. Analysis of Mining Waste Dump Site Stability Based on Multiple Remote Sensing Technologies // Remote Sensing. - 2018. - № 10. P. 2025. DOI:10.3390/rs10122025
19. Tabish R., Yang Z., Wu L., Xu Z., Cao Z., Zheng K. and Zhang Y. Predicting the Settlement of Mine Waste Dump Using Multi-Source Remote Sensing and a Secondary Consolidation Model // Frontiers in Environmental Science. - 2022. - № 10. P.885346. DOI: 10.3389/fenvs.2022.885346
20. Standarts for Geodesy and Cartography Geodetic. "Instructions for the development of survey justification and survey of the terrain survey using global navigation satellite systems GLONASS and GPS" dated 01.03.2002 No. 3-pr. // Federal service of Geodesy and Cartography of Russia. - 2002 - GKINP (ONTA) -02-262-02 (in Russian)
21. Klappstein B., Bonci G., Maston W. Implementation of Real Time Geotechnical Monitoring at an Open Pit Mountain Coal Mine in Western Canada // Mining Revue. - 2014. - № 20 (3), P. 2-14.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Поспехов Георгий Борисович:
кандидат геолого-минералогических наук,
доцент кафедры гидрогеологии и инженерной
геологии,
ведущий научный сотрудник Научного центра
геомеханики и проблем горного производства,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: pospehov@spmi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Posphehov Georgiy Borisovich:
candidate of geological-mineralogical sciences,
Senior lecturer in Department of Hydrogeology
and Engineering Geology, I
leading researcher in Research Center of Geomechanics
and Issues of Mining Industry,
St Petersburg Mining University,
St Petersburg, Russia,
e-mail: pospehov@spmi.ru



Кондакова Вероника Николаевна:
аспирант кафедры гидрогеологии и инженерной
геологии,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: s185009@stud.spmi.ru

Kondakova Veroika Nikolaevna:
postgraduate student of the Department of Hydrogeology
and Engineering Geology,
St Petersburg Mining University,
St Petersburg, Russia,
e-mail: s185009@stud.spmi.ru



Кутепова Надежда Андреевна:
доктор технических наук,
главный научный сотрудник лаборатории
устойчивости бортов карьеров НЦ геомеханики
и проблем горного производства,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: Kutepova_NA@pers.spmi.ru

Kutepova Nadezhda Andreevna:
doctor of Technical Science,
Chief Researcher in Research Center of Geomechanics
and Issues of Mining Industry,
St Petersburg Mining University,
St Petersburg, Russia,
e-mail: Kutepova_NA@pers.spmi.ru

ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION:

1. Поспехов Г.Б. — анализ результатов исследования и подготовка данных, написание текста статьи. / Posphehov G.B. — analysis of the results, data preparation, draft preparation, review and editing;
2. Кондакова В.Н. — выполнение работы по систематизации материала, написание текста статьи. / Kondakova V.N. — systematization of the material, draft preparation and editing;
3. Кутепова Н.А. — генерация идеи исследования, постановка задачи исследования. / Kutepova N.A. — developing of the idea of the research, formulation of the research objectives.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.