

Опыт мониторинга сдвижения поверхности подработанных территорий при ликвидации угольных шахт по данным дистанционного зондирования земли

О.Л. Гиниятуллина✉, П.В. Гречишкин, Н.Ю. Трошков
Кемеровский филиал АО «ВНИМИ», г. Кемерово, Российская Федерация
✉ info@vnimi.ru

Резюме: Описывается опыт мониторинга земной поверхности на подработанной территории в зонах городской застройки с использованием данных спутниковой радиолокационной съемки. Показаны результаты интерферометрической обработки данных и оценки вертикальных смещений поверхности, которые фиксируют процесс сдвижения горных пород после частичного затопления главного конвейерного уклона шахты. Определен полигон зданий социальной инфраструктуры, к которым должны применяться дополнительные меры по укреплению фундамента и мониторингу состояния строений.

Применение данных дистанционного зондирования для оценки вертикальных смещений земной поверхности подработанных территорий позволяет получить картину изменений в динамике на большой площади. Несмотря на интегральный характер результатов расчетов, полученные данные являются индикатором реальных физических процессов на поверхности массива горных пород. Учитывая, что при ликвидации горных выработок путем полного или частичного затопления происходит активизация сдвижения горного массива, а размещение городских объектов приводит к увеличению рисков их разрушения, необходимо вести обязательный контроль сдвижения и деформаций земной поверхности в рамках организованного сейсмогеодинамического полигона, и в этом отношении применение данных радиолокационного мониторинга позволяет не только существенно упростить процесс получения данных, но и обеспечивает широкий охват территорий и временной период.

Ключевые слова: подработанные территории, селитебные зоны, деформации поверхности; смещения поверхности, радиолокационные данные

Для цитирования: Гиниятуллина О.Л., Гречишкин П.В., Трошков Н.Ю. Опыт мониторинга сдвижения поверхности подработанных территорий при ликвидации угольных шахт по данным дистанционного зондирования земли. *Горная промышленность*. 2024;(3S):44–47. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-44-47>

Experience in monitoring land surface displacement of the undermined areas during coal mine abandonment using the Earth remote sensing data

O.L. Giniyatullina✉, P.V. Grechishkin, N.Yu. Troshkov
Kemerovo Branch, VNIMI JSC, Kemerovo, Russian Federation
✉ info@vnimi.ru

Abstract: The paper describes the experience of monitoring the land surface of the undermined area in zones of urban development using satellite radar survey data. The results of interferometric processing of data and assessment of the vertical displacements of the land surface are shown, which witness the process of rock displacement after partial flooding of the main conveyor slope of the mine. A range of social infrastructure buildings has been identified, which require additional measures to reinforce their foundations and monitor the condition of the structures.

Application of remote sensing data for assessment of vertical displacements of the land surface in the undermined territories helps to get an insight into the changes over a large area in dynamic terms. Despite the aggregated nature of the calculation results, the obtained data is an indicator of the real physical processes at the surface of the rock mass. Taking into account that mine abandonment with full or partial flooding activates displacement of the rock mass, while the locations of urban facilities leads to increasing risks of their destruction, it is necessary to conduct mandatory monitoring of the land surface displacement and deformations within the framework of a dedicated seismogeodynamic test site. In this respect, the use of the radar monitoring data allows not only to significantly simplify the process of data acquisition, but also provides a wide coverage of territories within a significant time period.

Keywords: undermined areas, residential areas, land surface deformations; land surface displacements, radar data

For citation: Giniyatullina O.L., Grechishkin P.V., Troshkov N.Yu. Experience in monitoring land surface displacement of the mined areas during coal mine abandonment using the Earth remote sensing data. *Russian Mining Industry*. 2024;(3S):44–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-44-47>

Введение

Современные темпы угледобычи и реструктуризации угольной отрасли в настоящее время приводят к массовому процессу ликвидации шахт. Несмотря на то что данный процесс имеет достаточно развитую научно-технологическую базу и обеспечивается на законодательном уровне¹, в настоящее время остается актуальным вопрос мониторинга деформаций поверхности подработанных территорий особенно в селитебных зонах. Как правило, при ликвидации угольных шахт мониторинг за деформациями поверхности, прописанный в официальных документах предприятия, осуществляют в пределах санитарной зоны. К сожалению, часто фиксируются изменения (провалы, оседание почвы и т.п.) на подработанных территориях под жилой застройкой и объектами социальной инфраструктуры.

В Российской Федерации много населенных пунктов, например, пос. Боровой (Кузбасс), г. Березники (Пермский край), пос. Горловка (ДНР) и др., которые изначально располагались вблизи границы горного отвода разрабатываемых месторождений, постепенно расширяясь по территории угледобывающих предприятий.

Современные темпы освоения поверхности подработанного пространства угольных шахт объектами социальной инфраструктуры трактуют необходимость разработки и применения достоверных методов диагностики больших по протяженности территорий. В настоящее время активно разрабатываются вопросы освоения подработанных пространств в рамках городских агломераций: от вопросов возникновения экологических проблем до расчета экономических рисков в результате эксплуатации данных территорий [1–4].

Тем не менее предлагаемые методы, как правило, ориентированы на небольшие площади и существенно ограничены во временном диапазоне исследования. Чаще всего исследуют участки с уже зафиксированным провалом без оценки состояния прилегающих территорий. Вопросы расширения пространства мониторинга без значимых технических и организационных усилий и затрат могут решаться с использованием данных дистанционного зондирования радиолокационного диапазона. С этой точки зрения применение данных дистанционного зондирования для мониторинга больших пространств селитебных зон является одним из наиболее эффективных и удобных инструментов.

Объект исследования

В Кемеровском филиале АО «Научно-исследовательский институт горной механики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр ВНИМИ» ведется мониторинг жилой застройки в пос. Боровой (Кемеровская область) площадью 300 м², которая располагается на территории ликвидированного объекта угольной шахты. Целью мониторинга является оценка влияния процессов

в выработанном пространстве на состояние поверхности в регламентированной санитарной зоне, а также за ее пределами.

Согласно проектной документации на данной территории располагается главный конвейерный уклон шахты, который был затоплен с 1998 по 2016 г. до отметки +150,3 м. В течение 2016–2020 гг. с наступлением водотолива с разведочного уклона уровень воды в нем был понижен и поддерживался на уровне горизонта +50,9 м до 2020 г. Начиная с 2020 г. вода не откачивалась, выработки затоплены до отметки +152,2 м.

Ликвидация объекта выполнена с установкой изоляционных перемычек, пространство между которыми засыпано по всему сечению. Фактическая ликвидация устья выполнена правильно, риски провалов сведены к минимуму. Несмотря на это на поверхности в 2021 г. были зафиксированы зоны провалов в районах городской застройки, что потребовало дополнительного изучения местности.

В 2022 г. специалистами ВНИМИ выполнялись работы по оценке состояния указанной территории геофизическими инструментальными средствами, проводилось математическое моделирование и рассчитывались смещения поверхности по данным дистанционного зондирования. Именно использование радарных снимков позволило показать динамический характер изменений и обосновать основные технологические решения.

Метод радарной интерферометрии для оценки вертикальных смещений поверхности

Для оценки деформации земной поверхности с точки зрения вертикальных смещений исследуемой территории использовались радиолокационные снимки активного сенсора Sentinel-1A и Sentinel-1B² Европейского космического агентства (ESA). Периодичность прохода спутника над исследуемой территорией составляет 12 дней. Первичными данными для расчета смещений являются снимки первого уровня обработки, содержащие амплитуду и фазу отраженного от земной поверхности сигнала.

Радарная интерферометрия обеспечивает одноментную съемку большой территории и минимальное влияние атмосферных помех (облачность, туман). Однако уплотненный снежный покров высотой более 10 см является сильным экраном для радиоизлучения и сильно искажает картину рельефа. Поэтому для расчета смещений требуется учитывать этот климатический фактор, например, для юга и центра Западной Сибири рекомендуется использовать снимки с апреля по октябрь.

Технология получения смещений и скоростей смещений содержит последовательность вычислительных процедур, включающую подготовку снимков в специализированном ПО Snap³, развертку фазы в специализированном ПО Snaphu⁴ и расчет скоростей смещений методом SBAS в специализированном ПО Mintpy⁵. Вся схема расчета и отдельные алгоритмы вычислений стандартизованы, во многом автоматизированы [5] и обеспечи-

1 Об утверждении Правил безопасности в угольных шахтах: Постановление Госгортехнадзора России от 05.06.2003 № 50 (ред. от 07.12.2012); РД 07-291-99 Инструкция о порядке ведения работ по ликвидации и консервации опасных производственных объектов, связанных с пользованием недрами. Охрана недр и геолого-маркшейдерский контроль: Сборник документов. Серия 07. Вып. 1. 2-е изд., испр. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2009. С. 21–43; Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород, земной поверхности и подработываемыми сооружениями на угольных и сланцевых месторождениях. Мин-во угольной пром-сти СССР: Утв. 30.12.87. Разраб. ВНИМИ; Состав.: И.А. Петухов, Н.И. Митичкина, В.Н. Земисев и др. М.: Недра; 1989. 96 с.; иквидация угольных шахт. Защита земной поверхности от затопления горных выработок. Рекомендации: КД 12.12.004-98: Утв. Министерством угольной промышленности Украины 20.12.98. Донецк; 1998. 46 с.

2 СНИП 2.01.09-91 Здания и сооружения на подработываемых территориях.

3 Snap Download – STEP. Available at: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/> (accessed: 28.05.2024).

4 Snaphu: statistical-cost, network-flow algorithm for phase unwrapping. Available at: <https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/> (accessed: 28.05.2024).

5 MintPy. Available at: <https://mintpy.readthedocs.io/en/latest/> (accessed: 28.05.2024).

вают высокую достоверность значений конечных величин, прежде всего скоростей смещений.

Конечным продуктом является векторная точечная карта. Каждая точка имеет набор атрибутов, в т.ч. географические координаты, отклонение от цифровой модели рельефа на дату снимка, среднюю скорость изменения вертикальных смещений (мм/год) и другое. Финальное разрешение составляет 20×20 м на точку. Следовательно, каждая точка представляет собой интегральный показатель величины смещения в данном квадрате, который формируется как средняя величина изменения поверхности.

К сожалению, в настоящее время доступ к ресурсам Европейского космического агентства сопряжен с определенными трудностями. Кроме того, в 2022 г. выбыл из эксплуатации сенсор Sentinel-1B, и многие территории не снимаются вообще либо снимаются крайне редко и нерегулярно. Но сама технология в силу отмеченных преимуществ продолжает развиваться. Перспективным источником регулярных высококачественных радарных снимков ближайшем будущем может стать российский сенсор КА «Кондор-ФКА»⁶.

Результаты расчетов и их обсуждение

Область интереса представляет квадрат со стороной 7,5 км, накрывающий п. Боровой в пригороде г. Кемерово. Для определения скоростей смещений на исследуемой территории в длительной ретроспективе использованы снимки за 5 лет – с 2018 по 2022 г. С учетом сезонности это составило в среднем 18 снимков в год и 90 снимков на все исследование.

На рис. 1 показаны результаты расчетов смещений за указанный промежуток времени.

В 2018 г. в зоне обследования не зафиксированы существенные подвижки земной поверхности. Методами радарной интерферометрии зафиксированы отдельные участки изменения поверхности в диапазоне [–7; –15] см вне зоны закрытого угольного объекта.

В 2019 г. формируются отчетливые зоны смещений в диапазоне [0; –10] см по всей длине устьевой части Главного конвейерного уклона. Ширина коридора изменения поверхности изменяется от 118 до 206 м по поверхности.

В 2020 г. процессы смещения усиливаются, площадь изменения возрастает, ширина полосы изменений достигает 350 м, с вертикальным оседанием в пределах [0; –10] см.

В 2021 г. изменения в нижней части исследуемой зоны локализуются, хотя по общей площади также происходят деформационные процессы с оседанием в пределах 10 см.

В 2022 г. формируются отчетливые зоны смещений в диапазоне [0; –8] см, которые соответствуют устьевой части Главного конвейерного уклона. Можно сделать заключение о прекращении активных изменений на исследуемой площади.

Таким образом, на выделенной в результате анализа территории следует вести дополнительный мониторинг зданий социальной инфраструктуры в соответствии с официальной документацией⁷ и применять дополнительные методы для упрочнения фундаментов и сохранения объектов.

Заключение

Применение данных дистанционного зондирования для оценки вертикальных смещений земной поверхности подработанных территорий позволяет получить картину изменений в динамике на большой площади.

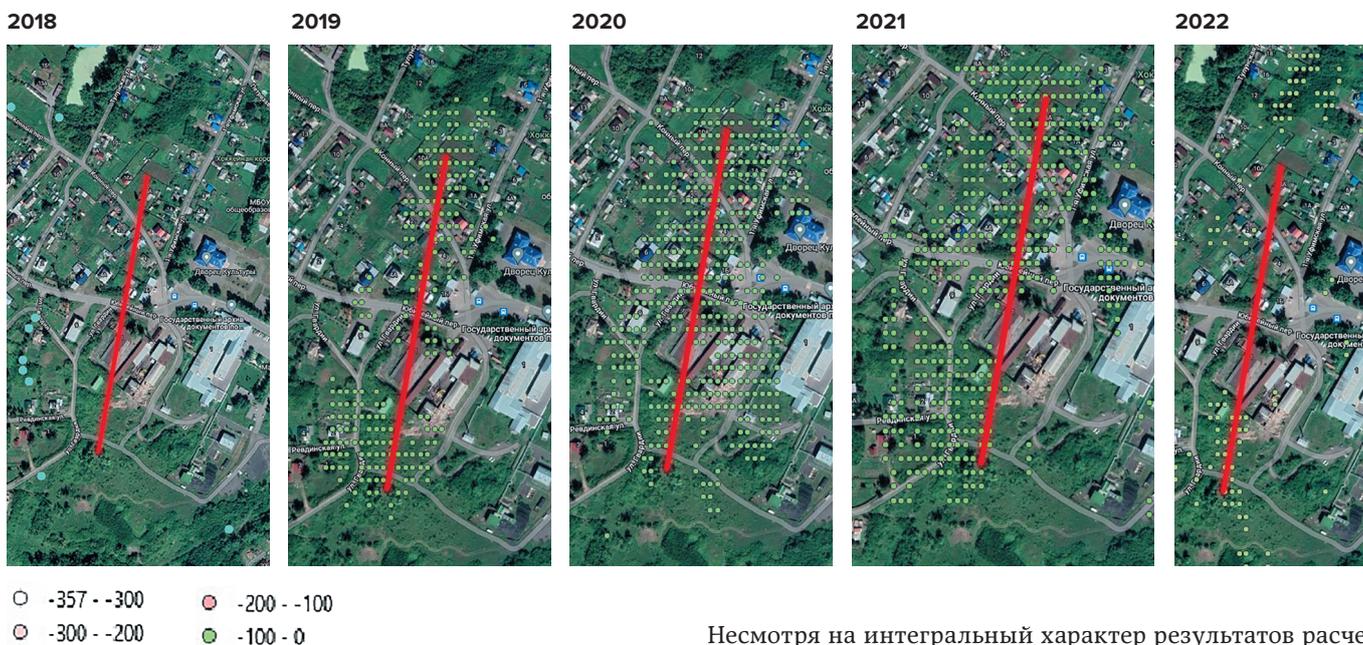


Рис. 1
Результаты расчета смещений методом радарной интерферометрии за 2018–2022 гг.

Fig. 1
Results of displacement calculations using the radar interferometry for the period from 2018 till 2022

Несмотря на интегральный характер результатов расчетов, полученные данные являются индикатором реальных физических процессов на поверхности массива горных пород.

Учитывая, что при ликвидации горных выработок пу-

⁶ КА «Кондор-ФКА» – Госкорпорация «Роскосмос». Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/38951/> (дата обращения: 28.05.2024).

⁷ СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений; Методические указания по проектированию промышленных зданий на просадочных грунтах. К.: НИИСК; 1984. 103 с.; Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений. М.: Стройиздат; 1975. 156 с.

тем полного или частичного затопления происходит активизация сдвижения горного массива, а размещение объектов городских объектов приводит к увеличению рисков их разрушения, необходимо вести обязательный контроль сдвижения и деформаций земной поверхности в рамках организованного сейсмогеодинамического полигона, и в этом отношении применение данных

радиолокационного мониторинга позволяет не только существенно упростить процесс получения данных, но и обеспечивает широкий охват территорий и временной период.

Список литературы / References

1. Питулько В.М., Кулибаба В.В. *Реновация природных систем и ликвидация объектов прошлого экологического ущерба*. М.; 2019. 497 с. https://doi.org/10.12737/monography_592d719605d0e6.49777507
2. Мамаев Ю.А., Стольников П.В. Модели природно-техногенных условий как основа зонирования подработанных территорий калийного месторождения по степени экономического риска. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2020;(3):91–96. <https://doi.org/10.31857/S0869780920030078>
 Mamaev Yu.A., Stol'nikova P.V. Models of natural-technogenic conditions as features of zoning undermined areas of potash deposit by the degree of economic risk. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2020;(3):91–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869780920030078>
3. Пустовойтенко В.П., Мансуров Е.Э. *Строительство зданий и сооружений на подрабатываемых территориях*. В кн.: *Перспективы развития строительных технологий: материалы конференции*. Днепропетровск; 2014. С. 133–138.
4. Кириллов С.Г., Семькин Е.С., Мокрицкая Н.И., Криштапович А.Р., Ефименко С.С. Сдвижение земной поверхности при отработке Талнахского и Октябрьского месторождения. Меры охраны подрабатываемых зданий и сооружений. *Горная промышленность*. 2020;(6): 106–111. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-6-106-111>
 Kirillov S.G., Semykin E.S., Mokritskaya N.I., Krishtapovich A.R., Efimenko S.S. Rock mass movement in development of Talnakh and Oktyabrskoye deposits. Measures to protect undermined buildings and facilities. *Russian Mining Industry*. 2020;(6):106–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-6-106-111>
5. Попов С.Е., Костылев М.А. Программный комплекс мониторинга смещений земной поверхности на базе массово-параллельной обработки радарных данных. В кн.: *Цибульский Г.М., Ваганов Е.А. (ред.) Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы 5-й Международ. науч. конф., г. Красноярск, 11–14 сент. 2018 г.* Красноярск: Сибирский федеральный университет; 2018. С. 173–184.

Информация об авторах

Гиниятуллина Ольга Леоновна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Кемеровский филиал АО «ВНИМИ», г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: info@vnimi.ru

Гречишкин Павел Владимирович – кандидат технических наук, директор, Кемеровский филиал АО «ВНИМИ», г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: info@vnimi.ru

Трошков Николай Юрьевич – заместитель директора, Кемеровский филиал АО «ВНИМИ», г. Кемерово, Российская Федерация

Information about the authors

Olga L. Giniyatullina – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Associate, Kemerovo Branch, VNIMI JSC, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: info@vnimi.ru

Pavel V. Grechishkin – Cand. Sci. (Eng.), Director, Kemerovo Branch, VNIMI JSC, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: info@vnimi.ru

Nikolay Yu. Troshkov – Deputy Director, Kemerovo Branch, VNIMI JSC, Kemerovo, Russian Federation

Article info

Received: 17.05.2024

Revised: 18.06.2024

Accepted: 29.06.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.05.2024

Поступила после рецензирования: 18.06.2024

Принята к публикации: 29.06.2024