

КОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСНОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

М.Р. Пономаренко¹, Ю.И. Кутепов¹, М.А. Волков², А.П. Гринюк³

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: pnmry@yandex.ru

² АО «СУЭК-Кузбасс», Ленинск-Кузнецкий, Россия

³ АО «СУЭК-Кузбасс», Филиал ООО «Сибниуглеобогатение» г. Прокопьевска, Прокопьевск, Россия

Аннотация: Обозначены существующие проблемы мониторинга деформаций земной поверхности при подземной разработке месторождений полезных ископаемых, обоснована необходимость применения комплексного подхода к его выполнению на основе использования современных наземных и дистанционных методов. Описаны особенности метода космической радарной интерферометрии и его основные преимущества перед другими маркшейдерско-геодезическими методами наблюдений. Проанализирован опыт применения космической радарной интерферометрии для мониторинга подработанных территорий на зарубежных и российских месторождениях. Выявлены основные направления применения космического радиолокационного зондирования в данной области. Обоснована актуальность использования космической радарной интерферометрии в системе комплексного деформационного мониторинга подрабатываемых территорий, в частности – на этапе ликвидации шахтных полей, в соответствии с существующими требованиями, предъявляемыми к производству измерений. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о необходимости адаптации существующих методик выполнения деформационного мониторинга с использованием космической радарной интерферометрии применительно к территориям ликвидируемых шахт с учетом специфики возникающих деформаций земной поверхности.

Ключевые слова: космическая радарная интерферометрия, деформации земной поверхности, деформационный мониторинг, подземная разработка, подработанные территории, ликвидация шахт, дистанционное зондирование Земли из космоса, космический радарный мониторинг.

Для цитирования: 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.

Satellite methods within integrated land surface deformation monitoring in a mine field

M.R. Ponomarenko¹, Yu.I. Kutepov¹, M.A. Volkov², A.P. Grinuk³

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: pnmry@yandex.ru

² JSK «SUEK-Kuzbass», Leninsk-Kuznetsk, Russia

³ JSK «SUEK-Kuzbass», Branch of LLC «Sibniugleobogashchenie», Prokopyevsk, Russia

Abstract: The article defines the current problems in the land surface deformation monitoring in case of underground mineral mining and validates an integrated approach using the advanced methods of terrain and remote monitoring. The features and advantages of satellite radar interferometry over the other geodetic surveying techniques are described. The experience of satellite radar interferometry in undermined terrain monitoring in Russia and abroad is reviewed. The potential ranges of use of remote sensing to that end are identified. It is of the current interest to integrate satellite radar interferometry in the undermined land deformation monitoring, in particular, during mine closure, in compliance with the effective standards imposed on gauging. The accomplished analysis allows arriving to a conclusion on the demandable adaptation of deformation monitoring with satellite radar interferometry to mine closure phases with regard to special nature of land surface deformation in this case.

Key words: satellite radar interferometry, land surface deformation, deformation monitoring, underground mining, undermined terrain, mine closure, remote sensing, space-based radar.

For citation: 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;(12):103-113. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-103-113.

Введение

Подземная разработка угольных месторождений относится к числу опасных производств из-за развития в массивах шахт сдвижения горных пород, особенно при подработке городов, населенных пунктов, промышленных комплексов, отдельных предприятий, водных объектов, а также объектов железнодорожного и трубопроводного транспорта. В этих случаях возникают деформационные явления, которые характеризуются неодинаковыми по направлению, величине и скорости смещениями земной поверхности, а попадающие в зону их развития механизмы, здания и сооружения (с рабочим персоналом и постоянно проживающими людьми) испытывают определенные риски.

Изучение и прогноз данных геомеханических процессов при подземной разработке угольных месторождений — одна из важнейших проблем горного производства. Она достаточно хорошо разработана для стадии эксплуатации шахты [1], когда ведется отработка пластов угля очистными забоями с полным

обрушением, деформации при этом достигают значительных величин. Так, при отработке свиты из трех пластов суммарной мощностью около 10 м на участке «Красноярский» шахты им. А.Д. Рубана максимальные оседания превысили 7 м [2]. После отработки запасов угля шахты подвергаются ликвидационным работам посредством затопления выработанного пространства и горных выработок подземными водами. В этом случае действие воды на породные массивы шахт заключается в изменении напряженно-деформированного состояния и физико-механических свойств пород, что также сказывается на их деформационном поведении.

В зависимости от степени подработанности породного массива восстановление напоров и уровней в них приводит либо к развитию процессов уплотнения, либо разуплотнения с подъемом поверхности земли [3, 4]. В частности, при затоплении шахт в г. Анжеро-Судженске отмечены подъемы поверхности до 1,5 м [5]. Данные геомеханические процессы уплотнения-разуплотнения мас-

сивов при затоплении шахт недостаточ- но хорошо изучены. Также практически не изучено их влияние на природные объекты, различные здания и сооруже- ния. Поэтому весьма важным в горной практике является выполнение дефор- мационного мониторинга на всех ста- диях существования шахт — от строи- тельства до ликвидации. Это позволит исключить риск возникновения природ- ных и техногенных катастроф, связанных с возникновением разрушающих дефор- мационных процессов, а также снизить экономические затраты на ликвидацию последствий разрушающих деформаций.

Ввиду сложности природно-техни- ческих систем подземной разработки, для обеспечения точности, достоверно- сти и оперативности наблюдений целе- сообразно применять комплексный под- ход к производству мониторинга дефор- маций. Однако на сегодняшний день отсутствуют методики выполнения комп- лексного деформационного мониторин- га с использованием современных тех- нологий съемки, включая космическую радарную интерферометрию.

В статье рассматривается опыт при- менения космической радарной интерфе- рометрии для наблюдения деформаций в зонах влияния подземной разработки и предлагается методика выполнения де- формационного мониторинга подрабо- танных территорий с применением кос- мической радарной интерферометрии.

Опыт применения радарной интерферометрии для деформационного мониторинга подработанных территорий

Актуальность использования косми- ческой радарной интерферометрии (РИ) в системе деформационного мониторин- га подработанных территорий обуслов- лена существенными преимуществами данного метода по сравнению с други-

ми способами наблюдений, к их числу относятся:

- Миллиметровый уровень точности определения деформаций земной по- верхности [6].

- Возможность выполнения съемки в любое время суток, вне зависимости от освещенности поверхности и при любых погодных условиях, в том числе в условиях облачности и тумана.

- Широкий пространственный охват съемки (площадь наблюдаемых объ- ектов может составлять сотни квадрат- ных километров).

- Высокая информативность, наблю- дение всей территории объекта, включая труднодоступные и опасные участки.

- Оперативность и регулярность по- лучения данных (при использовании тандемной съемки частота получения данных составляет 1–2 сут).

- Возможность наблюдения различ- ных видов объектов: зданий и сооруже- ний, бортов карьеров, отвалов горных пород, подработанных территорий, хво- стохранилищ и др.

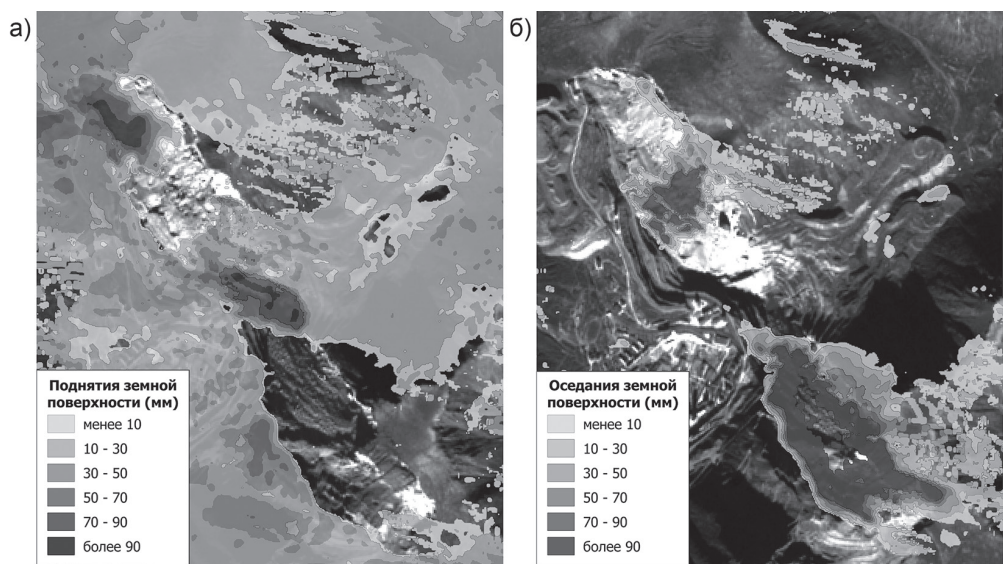
- Является полностью дистанцион- ным методом, не требующим присутст- вия на объекте.

- Получение и обработка данных проводятся удаленно.

- Возможность получения «истори- ческих» (архивных) данных.

- Наличие открытых источников данных интерферометрической съемки (снимки со спутника Sentinel-1) и про- грамного обеспечения для их обработки.

Метод РИ был использован для мо- ниторинга подработанных территорий Верхнекамского месторождения калий- ных солей (г. Березники), Соколовско- Сарбайского железорудного месторож- дения, подземных угольных выработок в окрестностях г. Польшаево Кемеров- ской области, Жезказганского месторож- дения меди и месторождений Караган- динского угольного бассейна (Казахстан)



Поднятия (а) и оседания (б) на территории Кировского рудника за период с 08.06.2015 по 09.09.2016, полученные по данным космической радиолокационной съемки

Uplift (a) and subsidence (b) in the Kirovsk mine area according to space-based radar mapping over the period from 8 June 2015 to 9 September 2016

[7–11]. Площадной мониторинг объектов открытой разработки Хибинских месторождений позволил выявить деформации не только на карьерах и отвалах, но также на смежных участках, подработанных действующим подземным рудником (рисунок) [12, 13].

В ряде случаев метод РИ позволил выявить деформации, которые не были определены с использованием инструментальных наблюдений. В частности, с помощью РИ были выявлены интенсивные оседания над Анненским рудником (Жезказганское медное месторождение, Казахстан). Полученные данные послужили основанием для приостановления работы шахты [10].

В перечисленных работах метод применялся в основном для мониторинга действующих выработок. Однако при мониторинге Верхнекамского месторождения удалось выявить оседания над закрытыми, но незаложенными выработками, в том числе в пределах гражданской застройки и промышленных объектов [7].

В зарубежной практике метод РИ применялся для мониторинга действующих выработок медного месторождения Эль-Теньенте (Чили), разрабатываемого крупнейшим в мире подземным рудником, месторождений Сиднейского (Австралия) и Верхнесилезского (Польша) угольных бассейнов, месторождений бурого угля Нитранского края (Словакия), месторождений Ордосского бассейна (Китай) [14–19]. Результаты наблюдений использовались в качестве входных данных для построения формирующихся мульд сдвижения [17, 20]. При закрытии угольных шахт РИ использовалась на месторождении Сюйчжоу (Китай), а также в Иллинойском (США), Рурском (Германия) и Нортумберленд-Даремском (Великобритания) бассейнах [21–23].

Применительно к ликвидируемым и закрываемым шахтам данный метод использовался для контроля деформаций поверхности земли и в качестве одного из источников данных для мониторинга

га процессов восстановления уровня грунтовых вод. В частности, на шахтах месторождения Сюйчжоу (Китай) применение РИ позволило выявить и проследить деформации земной поверхности после закрытия шахт: остаточные оседания, затем сменившие их поднятия, связанные с восстановлением уровня грунтовых вод, далее — вновь возникшие оседания, вызванные последующим уплотнением массива горных пород, и опять возобновившиеся поднятия, обусловленные дальнейшим поднятием уровня грунтовых вод [21]. При мониторинге подработанных территорий Нортумберленд-Даремского угольного бассейна (Великобритания) установлено, что поднятия земной поверхности коррелируют с повышением уровня грунтовых вод на отдельных участках закрытых шахт, являясь следствием повышения порового давления в покрывающих породах после прекращения откачки грунтовых вод [23].

На основе анализа существующих исследований можно выделить основные направления использования космической РИ в рамках деформационного мониторинга объектов подземной разработки:

- выявление и мониторинг активных деформаций земной поверхности над действующими горными выработками;
- выявление и мониторинг остаточных деформаций в районах ликвидированных и закрытых шахт;
- выявление и мониторинг деформаций горнотехнических сооружений и объектов инфраструктуры, вызванных ведением подземных горных работ;
- картографирование рельефа земной поверхности (построение цифровых моделей рельефа);
- получение входных данных для прогнозирования развития деформационных процессов;
- мониторинг процессов восстановления грунтовых вод.

При этом РИ служит источником информации не только для оперативной оценки текущей ситуации, но также позволяют проследить динамику развития процессов в прошлом на основе использования архивных данных.

Обоснование методики комплексного мониторинга деформаций подработанных территорий

В настоящее время РИ практически не используется в качестве самостоятельного метода наблюдений, что объясняется многими обстоятельствами, в первую очередь, недостаточной его исследованностью применительно к различным горно-геологическим условиям разработки месторождений. Поэтому в настоящее время РИ можно применять при выполнении деформационного мониторинга в совокупности со стандартными маркшейдерско-геодезическими наблюдениями (наземными, аэрофотосъемкой).

В качестве самостоятельного метода мониторинга РИ можно использовать тогда, когда невозможны другие его виды, и он является единственно доступным, а именно:

- при наличии участков развития опасных горно-геологических процессов;
- на территориях ведения боевых действий;
- в горах и пр.

На текущий момент времени продолжается оставаться открытым вопрос научно-методического обоснования выполнения комплексного деформационного мониторинга с использованием РИ. Данная проблема актуальна как для отработки месторождений открытыми горными работами, так и для месторождений, где осуществляется подземная разработка.

Комплексный деформационный мониторинг основывается на комбиниро-

ванном использовании различных технологий и методов наблюдений. Ключевой задачей организации комплексного деформационного мониторинга является определение наиболее предпочтительного набора методов, применение которых обеспечит выполнение основных требований по точности, оперативности, пространственному охвату и автоматизации, предъявляемых к производству наблюдений. Для решения этой задачи необходимо изучить свойства и оценить сложность наблюдаемого объекта, а также проанализировать особенности и технические характеристики методов наблюдений [24].

Наиболее эффективным подходом, используемым для анализа и систематизации свойств горнотехнических объектов, является их типизация по степени сложности. В настоящее время разработаны типизации природно-технических систем открытой разработки месторождений полезных ископаемых, учитывающие виды горных работ, состав горнотехнических сооружений, инженерно-геологическое и гидрогеологическое строение техногенных и природных массивов, развивающиеся при этом геомеханические процессы, а также физико-географические факторы [24–26].

Использование типизации горнотехнических объектов в качестве основы для составления программы мониторинга состояния природно-технических систем в целом и мониторинга деформаций — в частности, подтвердило свою эффективность на примере объектов открытой разработки угольных месторождений [26]. В связи с этим, адаптация данного подхода к объектам подземных горных работ и разработка соответствующей типизации является актуальной задачей.

Основными этапами типизации являются:

1. Определение объектов типизации в составе природно-технических систем подземной разработки месторождений.

2. Выбор и обоснование показателей для каждого из выделенных объектов подземной разработки, соответствующих инженерно-геологическим, гидрогеологическим, физико-географическим и горнотехническим факторам.

3. Оценивание выделенных показателей с использованием балльного метода экспертных оценок.

4. Расчет количественного выражения сложности объектов.

При типизации объектов подземной разработки необходимо учитывать следующие показатели: стадия существования шахты (эксплуатация/ликвидация), тип горных пород, гидрогеологические условия массивов, деформационные процессы и т.д.

Помимо типизации и оценки сложности горнотехнических объектов используется классификация существующих методов мониторинга по следующим признакам:

- способу измерений (контактные/дистанционные методы);
- пространственному охвату наблюдений (площадные/точечные методы);
- степени автоматизации наблюдений (неавтоматизированные/автоматизированные/автоматические методы) [24].

Для иллюстрации данного подхода в качестве основного показателя сложности объектов подземной разработки используется стадия существования шахты, напрямую влияющая на характер, величины и скорости деформаций. В данной статье рассматриваются 2 варианта — эксплуатация и ликвидация, для которых обоснован комплекс методов деформационного мониторинга. В связи с тем, что проведение непосредственных наблюдений в возможных зонах образования опасных деформаций

(воронок, провалов и пр.) не допускается, а также учитывая значительную площадь зон влияния подземной разработки, для мониторинга активно подрабатываемых территорий рекомендуется использовать методы, являющиеся:

- дистанционными (наземные, аэрокосмические);
- площадными;
- автоматизированными и/или автоматическими.

К числу таких методов относятся: лазерное сканирование, наземная и космическая радарная съемка, аэрофото-съемка. При этом рекомендуется использовать набор методов для получения наиболее полной и оперативной информации об обстановке и динамике деформаций. Космическую РИ рекомендуется использовать в качестве базового метода постоянного площадного контроля деформаций. При наличии в зоне влияния подземной разработки других инженерно-технических объектов для мониторинга качественных показателей земной поверхности и дополнительного контроля объектов инфраструктуры применяется оптическая съемка из космоса и/или съемка с БПЛА.

На основе получаемых данных выполняется планирование и организация наземных маркшейдерско-геодезических наблюдений (точечных и автоматизированных) на отдельных участках подработанной территории, требующих более детальных и высокоточных измерений.

На этапе ликвидации шахт мониторинг выполнятся методами:

- дистанционными (аэрокосмическими);
- площадными;
- автоматизированными и/или автоматическими.

Базовым методом так же, как и на стадии эксплуатации, является космическая РИ. Площадной мониторинг может

быть дополнен использованием наземных бесконтактных методов (лазерное сканирование, наземная радарная съемка). Результаты космической радарной съемки (и других методов) применяются для организации наземных маркшейдерско-геодезических наблюдений (точечных и автоматизированных).

Выводы

Анализ возможностей и опыта применения метода космической радарной интерферометрии при мониторинге подработанных участков земной поверхности на территории ликвидируемых выработок позволяет сделать вывод о том, что его использование в составе комплекса методов наземных и дистанционных методов съемки повышает эффективность и достоверность выполняемых наблюдений. Несмотря на ряд преимуществ данного метода перед другими технологиями наблюдений, его применение на данный момент ограничено и требует обоснования использования в рамках комплексного деформационного мониторинга подработанных территорий, основанного на оценке сложности наблюдаемых объектов и учитывающего особенности используемых методов съемки.

На основе анализа и классификации современных методов деформационного мониторинга предложен подход к выбору комплекса методов наблюдения деформаций земной поверхности в зоне ведения подземных работ.

Полученные результаты являются первым этапом разработки научно-методического обоснования деформационного мониторинга, требующего наиболее полного учета инженерно-геологических, гидрогеологических, физико-географических и горнотехнических факторов, влияющих на процессы сдвижения подработанного массива и деформаций поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ПБ 07-269-98. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях: утв. Минтопэнерго РФ 16.03.1998; введен в действие с 01.10.1998. — СПб.: ВНИМИ, 1998. — 291 с.
2. Kutepov Y. Y. The study of formation mechanism of earth surface failures due to longwall coal mining // *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proc. of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. 2018. Vol. 2. Pp. 1615 — 1619.
3. Кутепова Н. А. Инженерно-геологическое обоснование прогноза гидрогеомеханических процессов при ведении горных работ: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.16. — СПб., 2010. — 424 с.
4. Кутепов Ю. И., Кутепова Н. А., Кутепов Ю. Ю., Саблин М. В. Геомеханические процессы при подработке техногенных и естественных массивов // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. — 2019. — № 3. — С. 282 — 294.
5. Кутепова Н. А., Кутепов Ю. И., Шабаров А. Н. Мониторинг гидрогеомеханических процессов при затоплении шахт Анжеро-Судженска // *Записки Горного института*. — 2012. — Т. 197. — С. 215 — 220.
6. Кантемиров Ю. И. Краткие теоретические основы радарной интерферометрии и ее многопроходных вариаций Ps и SBAs // *Геоматика*. — 2012. — № 1. — С. 22 — 26.
7. Кашников Ю. А., Мусихин В. В., Лысков И. А. Определение оседаний земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых по данным радарной интерферометрии // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2012. — № 4. — С. 68 — 77.
8. Усанова А. В., Усанов С. В. Мониторинг сдвижения земной поверхности при разработке Соколовско-Сарбайского месторождения методом радарной интерферометрии // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2018. — № 4. — С. 28 — 33.
9. Эпов М. И., Миронов В. Л., Чимитдоржиев Т. Н., Захаров А. И., Захарова Л. Н., Селезнев В. С., Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В. Наблюдение просадок поверхности земли в районе подземных угольных выработок Кузбасса по данным радиолокационной интерферометрии ALOS PALSAR // *Исследование Земли из Космоса*. — 2012. — № 4. — С. 26 — 29.
10. Мансуров В. А., Сатов М. Ж., Жантуев Р. Т., Кантемиров Ю. И. Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности и сооружений на Жезказганском месторождении меди (Республика Казахстан) // *Геоматика*. — 2012. — № 1. — С. 77 — 83.
11. Компания «Совзонд»: [сайт]. URL: <https://sovzond.ru/> (дата обращения: 09.07.2020).
12. Цирель С. В., Таратинский Г. М., Пономаренко М. Р., Кантемиров Ю. И. Опыт организации мониторинга деформаций земной поверхности в зоне ведения горных работ на предприятиях АО «Апатит» (Мурманская область) с применением метода космической радарной интерферометрии // *Маркшейдерский вестник*. — 2017. — № 5. — С. 57 — 63.
13. Ponomarenko M. R., Pimanov I. Yu. Implementation of synthetic aperture radar and geoinformation technologies in the complex monitoring and managing of the mining industry objects // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. Vol. 574. Pp. 291 — 299. DOI 10.1007/978-3-319-57264-2_30.
14. Falorni G., Del Conte S., Bellotti F., Colombo D. InSAR monitoring of subsidence induced by underground mining operations // *Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, Australian Centre for Geomechanics, Perth*. 2018. Pp. 705 — 712.
15. Pawluszek-Filipiak K., Borkowski A. Integration of DInSAR and SBAS techniques to determine mining-related deformations using sentinel-1 data: the case study of Rydułtowy Mine in Poland // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Pp. 242.
16. Czikhardt R., Papco J., Bakon M., Liscak P., Ondrejka P., Zlocha M. Ground stability monitoring of undermined and landslide prone areas by means of Sentinel-1 multi-temporal InSAR, case study from Slovakia // *Geosciences*. 2017. Vol. 7. No 3. P. 87.

17. Fan H., Gao X., Yang J., Deng K., Yu Y. Monitoring mining subsidence using a combination of phase-stacking and offset-tracking methods // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. No 7. Pp. 9166 – 9183.

18. Ma C., Cheng X., Yang Y., Zhang X., Guo Z., Zou Y. Investigation on mining subsidence based on multi-temporal InSAR and time-series analysis of the small baseline subset – case study of working faces 22201-1/2 in Bu'ertai Mine, Shendong Coalfield, China // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. No 11. P. 951.

19. Bingqian Chen, Zhenhong Li, Chen Yu, David Fairbairn, Jianrong Kang, Jinshan Hu, Liang Liang Three-dimensional time-varying large surface displacements in coal exploiting areas revealed through integration of SAR pixel offset measurements and mining subsidence model // *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 240. Article 111663.

20. Liu D., Shao Y., Liu Z., Riedel B., Sowter A., Niemeier W., Bian Z. Evaluation of InSAR and TomoSAR for monitoring deformations caused by mining in a mountainous area with high resolution satellite-based SAR // *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6. No 2. Pp. 1476 – 1495.


21. 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. Pp. 1392.

22. Walter D., Wegmüller U., Spreckels V., Hannemann W., Busch W. Interferometric monitoring of an active underground mining field with high-resolution SAR sensors // *Proceedings of ISPRS Hannover Workshop 2009 «High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information»*. Hannover, 2009.

23. Gee D., Bateson L., Sowter A., Grebby S., Novellino A., Cigna F., Marsh S., Banton C., Wyatt L. Ground motion in areas of abandoned mining: Application of the intermittent SBAS (ISBAS) to the Northumberland and Durham Coalfield, UK // *Geosciences*. 2017. Vol. 7. No 3. Pp. 85.

24. Пономаренко М.Р. Разработка метода деформационного мониторинга открытых горных работ в условиях Крайнего севера с использованием космического радиолокационного зондирования: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16. – СПб., 2018. – 155 с.

25. Кутепов Ю. И., Кутепова Н. А. Методология инженерно-геологического изучения гидрогеомеханических процессов в техногенно нарушенных массивах при разработке МПИ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2014. – № 8. – С. 123–131.

26. Сергина Е. В. Комплексный мониторинг состояния природно-технических систем открытой разработки угольных месторождений: дис. ...канд. техн. наук: 25.00.16. – СПб., 2015. – 165 с. 

REFERENCES

1. *Pravila okhrany sooruzheniy i prirodnykh ob"ektov ot vrednogo vliyaniya podzemnykh gornykh razrabotok na ugol'nykh mestorozhdeniyakh PB 07-269-98* [Rules for the protection of structures and natural objects from the harmful effects of underground mining in coal deposits PB 07-269-98], Saint-Petersburg, VNIMI, 1998, 291 p.

2. Kutepov Y. Y. The study of formation mechanism of earth surface failures due to longwall coal mining. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proc. of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. 2018. Vol. 2. Pp. 1615 – 1619.

3. Kuteпова N. A. *Inzhenerno-geologicheskoe obosnovanie prognoza gidrogeomekhanicheskikh protsessov pri vedenii gornykh rabot* [Engineering-geological substantiation of hydrogeomechanical process forecasting in mining], Doctor's thesis, Saint-Petersburg, 2010, 424 p.

4. Kutepov Yu. I., Kuteпова N. A., Kutepov Yu. Yu., Sablin M. V. Geomechanical processes during the undermining of man-made and natural rock masses. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Nauki o zemle*. 2019, no 3, pp. 282 – 294. [In Russ].

5. Kuteпова N. A., Kutepov Yu. I., Shabarov A. N. Monitoring of hydrogeomechanical processes at the flooding of Angero-Sujensk mines. *Journal of Mining Institute*. 2012. Vol. 197, pp. 215 – 220. [In Russ].

6. Kantemirov Yu. I. Brief theoretic principles of radar interferometry and its multipass variations: PS and SBAs. *Geomatics*. 2012, no 1, pp. 22–26. [In Russ].

7. Kashnikov Yu. A., Musikhin V. V., Lyskov I. A. Radar interferometry-based determination of ground surface subsidence under mineral mining. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2012, no 4, pp. 68–77. [In Russ].

8. Usanova A. V., Usanov S. V. Monitoring of ground surface displacement under mining of the Sokolovo-Sarbai deposit by the radar interferometry method. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2018, no 4, pp. 28–33. [In Russ].

9. Epov M. I., Mironov V. L., CHimitdorzhiev T. N., Zakharov A. I., Zakharova L. N., Seleznev V. S., Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V. Observation of Earth's surface subsidence in the area of Kuzbass underground coal mining with ALOS PALSAR radar interferometry. *Earth Observation and Remote Sensing*. 2012, no 4, pp. 26–29. [In Russ].

10. Mansurov V. A., Satov M. Zh., Zhantuev R. T., Kantemirov Yu. I. Satellite radar monitoring of land and buildings subsidence over Zhezkazgan copper field (Republic of Kazakhstan). *Geomatics*. 2012, no 1, pp. 77–83. [In Russ].

11. *Sovzond Company*, available at: <https://sovzond.ru/> (accessed 09.07.2020).

12. Tsirel' S. V., Taratinskiy G. M., Ponomarenko M. R., Kantemirov Yu. I. Earth surface deformation monitoring in the mining areas of JSC Apatit enterprise (Murmansk region) using radar interferometry. *Mine Surveying Bulletin*. 2017, no 5, pp. 57–63. [In Russ].

13. Ponomarenko M. R., Pimanov I. Yu. Implementation of synthetic aperture radar and geoinformation technologies in the complex monitoring and managing of the mining industry objects. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. Vol. 574. Pp. 291–299. DOI 10.1007/978-3-319-57264-2_30.

14. Falorni G., Del Conte S., Bellotti F., Colombo D. InSAR monitoring of subsidence induced by underground mining operations. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*, Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2018. Pp. 705–712.

15. Pawluszek-Filipiak K., Borkowski A. Integration of DInSAR and SBAS techniques to determine mining-related deformations using sentinel-1 data: the case study of Ryduktowy Mine in Poland. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Pp. 242.

16. Czikhardt R., Papco J., Bakon M., Liscak P., Ondrejka P., Zlocha M. Ground stability monitoring of undermined and landslide prone areas by means of Sentinel-1 multi-temporal InSAR, case study from Slovakia. *Geosciences*. 2017. Vol. 7. No 3. P. 87.

17. Fan H., Gao X., Yang J., Deng K., Yu Y. Monitoring mining subsidence using a combination of phase-stacking and offset-tracking methods. *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. No 7. Pp. 9166–9183.

18. Ma C., Cheng X., Yang Y., Zhang X., Guo Z., Zou Y. Investigation on mining subsidence based on multi-temporal InSAR and time-series analysis of the small baseline subset – case study of working faces 22201-1/2 in Bu'ertai Mine, Shendong Coalfield, China. *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. No 11. P. 951.

19. Bingqian Chen, Zhenhong Li, Chen Yu, David Fairbairn, Jianrong Kang, Jinshan Hu, Liang Liang Three-dimensional time-varying large surface displacements in coal exploiting areas revealed through integration of SAR pixel offset measurements and mining subsidence model. *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 240. Article 111663.

20. Liu D., Shao Y., Liu Z., Riedel B., Sowter A., Niemeier W., Bian Z. Evaluation of InSAR and TomoSAR for monitoring deformations caused by mining in a mountainous area with high resolution satellite-based SAR. *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6. No 2. Pp. 1476–1495.

21. 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. Pp. 1392.

22. Walter D., Wegmüller U., Spreckels V., Hannemann W., Busch W. Interferometric monitoring of an active underground mining field with high-resolution SAR sensors. *Proceedings of ISPRS Hannover Workshop 2009 «High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information»*. Hannover, 2009.

23. Gee D., Bateson L., Sowter A., Grebby S., Novellino A., Cigna F., Marsh S., Banton C., Wyatt L. Ground motion in areas of abandoned mining: Application of the intermittent SBAS (ISBAS) to the Northumberland and Durham Coalfield, UK. *Geosciences*. 2017. Vol. 7. No 3. Pp. 85.

24. Ponomarenko M.R. *Razrabotka metoda deformatsionnogo monitoringa otkrytykh gornykh rabot v usloviyakh Kraynego severa s ispol'zovaniem kosmicheskogo radiolokatsionnogo zondirovaniya* [Development of a method for deformation monitoring of open-pit mining in the Far North regions using space radar sensing], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, 2018, 155 p.

25. Kutepov Yu. I., Kutepova N.A. Methodology of engineering geological study of geotechnical processes within technogenically disturbed rock mass at exploitation of mineral deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no 8, pp. 123–131. [In Russ].

26. Sergina E.V. *Kompleksnyy monitoring sostoyaniya prirodno-tekhnicheskikh sistem otkrytoy razrabotki ugol'nykh mestorozhdeniy* [Complex monitoring of the state of coal open-pit mining natural-technical systems], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, 2015, 165 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Пономаренко Мария Руслановна*¹ — канд. техн. наук, ведущий инженер, e-mail: pnmry@yandex.ru,

*Кутепов Юрий Иванович*¹ — д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией, e-mail: koutepovy@mail.ru,

Волков Михаил Александрович — канд. техн. наук, заместитель технического директора — начальник управления перспективного развития и лицензирования, АО «СУЭК-Кузбасс», Ленинск-Кузнецкий, e-mail: volkovma@suek.ru,

Гринюк Алексей Павлович — канд. техн. наук, заместитель управляющего филиалом,

АО «СУЭК-Кузбасс», Филиал ООО «Сибниуглеобогашение» г. Прокопьевска,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Пономаренко М.Р., e-mail: pnmry@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*M.R. Ponomarenko*¹, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer, e-mail: pnmry@yandex.ru,

*Yu.I. Kutepov*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Laboratory, e-mail: koutepovy@mail.ru,

M.A. Volkov, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Technical Director — Head of the Department for Prospective Development and Licensing, JSK «SUEK-Kuzbass»,

652507, Leninsk-Kuznetsk, Russia, e-mail: volkovma@suek.ru,

A.P. Grinuk, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Branch Manager, JSK «SUEK-Kuzbass», Branch of LLC «Sibniugleobogaschenie»

Prokopyevsk, 653000, Prokopyevsk, Russia,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: M.R. Ponomarenko, e-mail: pnmry@yandex.ru.

Получена редакцией 10.07.2020; получена после рецензии 18.08.2020; принята к печати 10.11.2020.

Received by the editors 10.07.2020; received after the review 18.08.2020; accepted for printing 10.11.2020.