

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.87.44.004

УДК 528.852.8:528.8.044.1

© Л. С. Миков, В. П. Потапов, 2024

Л. С. МИКОВ

младший научный сотрудник
ФИЦ ИВТ, г. Кемерово
e-mail: mikov@ict.sbras.ru



В. П. ПОТАПОВ

д-р техн. наук, проф.,
главный научный сотрудник
ФИЦ ИВТ, г. Кемерово
e-mail: vadimptpv@gmail.com



ПРИМЕНЕНИЕ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ (НА ПРИМЕРЕ КУЗБАССА)

В работе рассмотрены вопросы комплексной оценки геомеханических и термодинамических процессов на территории Кузбасса. Продемонстрировано применение многопроходных серий спутниковых радарных данных с космического аппарата Sentinel-1 с использованием методов радарной интерферометрии для определения средних скоростей изменения вертикальных смещений земной поверхности. Приведены примеры использования алгоритма REACTIV на основе амплитудной составляющей радарных изображений. Представлены результаты комбинированного применения радиолокационных и мультиспектральных данных.

Ключевые слова: РАДАРНЫЕ ДАННЫЕ, МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ, РАДАРНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, СПУТНИКОВЫЙ РАДАРНЫЙ МОНИТОРИНГ, СМЕЩЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, МЕТОД МАЛЫХ БАЗОВЫХ ЛИНИЙ, МЕТОД УСТОЙЧИВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ, ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня Кемеровская область — один из главных центров горнодобывающей промышленности в России. По данным на апрель 2024 года [1] в Кузбассе работает 38 шахт и 57 разрезов. Высокая техногенная нагрузка, связанная с ежегодным увеличением объемов угледобычи, ведет к перераспределению напряженно-деформируемого состояния значительных объемов горной массы с неблагоприятными последствиями для окружающей

природной среды [2]. В таких регионах деформации земной поверхности, вызванные неравномерными оседаниями и горизонтальными сдвигами горных пород, охватывают обширные территории и могут привести к аварийным ситуациям. А это, в свою очередь, может нанести вред не только окружающей среде и работе предприятия, но и людям.

В настоящее время мониторинг смещений земной поверхности осуществляются геодезическими методами с использованием

электронного тахеометра, способами спутниковой навигации с помощью GPS-приемников. Данные методы позволяют определить значения деформаций земной поверхности на отдельных линейных участках [3]. Однако такие методы требуют больших трудозатрат и не позволяют оценить динамику смещений на больших площадях. Альтернативным методом является использование спутниковых радарных снимков для оценки динамики смещений. Из преимуществ такого метода следует отметить независимость от погодных условий и времени суток, возможность оценки деформаций на больших площадях (несколько десятков км²), высокая точность. Начиная с 2007 года в Кемеровском филиале ФИЦ ИВТ были развернуты исследования по оценке возможности применения методов радарной интерферометрии для решения широкого круга задач геомеханики и экологии большого горнопромышленного региона — Кузбасса

В этих исследованиях мы сделали упор на несколько основных методах обработки радарных снимков:

- дифференциальная интерферометрия (DinSAR). Используются для обработки двух изображений;

- метод постоянных отражателей (PS). Используется для точечной оценки деформаций на основе многопроходной серии изображений;

- метод малых базовых линий (SBaS). Используется для площадной оценки деформаций на основе многопроходной серии изображений.

Примеры результатов обработки такими методами представлены на рис. 1.

Принцип радарной интерферометрии заключается в следующем. Каждый пиксель спутникового изображения содержит информацию о действительной и мнимой части волны, отраженной от участка земной поверхности и принятой спутником. Таким образом, спутниковый снимок имеет две составляющие: действительную и мнимую часть, которые могут быть преобразованы в амплитудную (яркостную) и фазовую составляющие изображения. Отметим, что типичный размер участка земной поверхности в одном пикселе изображения превышает квадратный метр, что делает невозможным определение миллиметровых смещений по яркостной составляющей изображения. Для этой цели используется анализ фазовых составляющих набора снимков.

На основе набора фазовых составляющих радарных снимков, полученных спутником в разные моменты времени, рассчитывается ее изменение с течением времени. Изменение фазовой составляющей связано линейной зависимостью с разностью хода волны, отраженной от поверхности и, таким образом, появляется возможность измерять

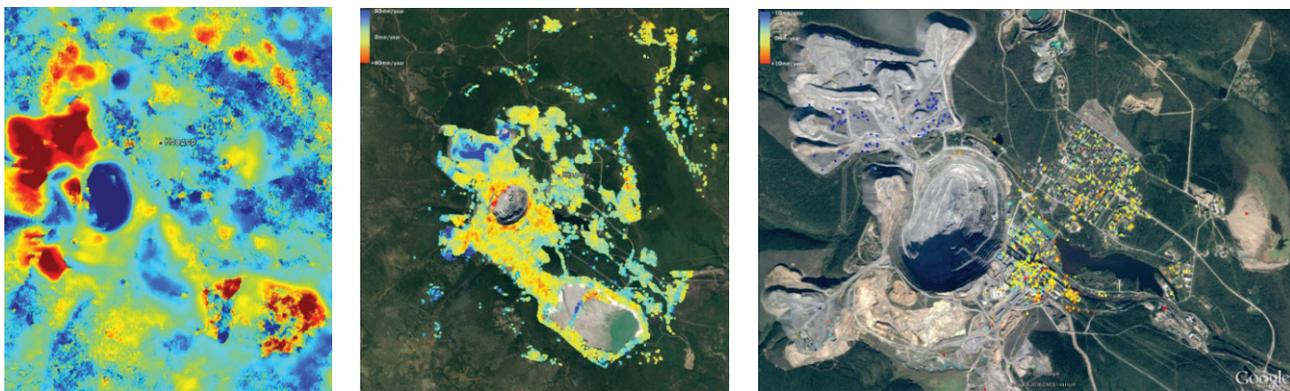


Рис. 1. Примеры результатов обработки радарных данных разными методами.
 Слева — карта вертикальных смещений (метод DinSAR);
 по центру — карта средних скоростей изменения вертикальных смещений (метод SBaS),
 справа — карта средних скоростей изменения вертикальных смещений (метод PS).
 Территория Ковдорского ГОК (Мурманская область)

вертикальные смещения объектов земной поверхности, сравнимые с длиной волны сигнала спутника, имеющей порядок нескольких сантиметров.

Основное отличие методов — количество исходных данных для обработки. Например, для метода дифференциальной интерферометрии используется пара радарных изображений, снятых с небольшим временным промежутком (от нескольких дней до пары недель). В результате мы получаем карту смещений земной поверхности, которые произошли за период между съемками. Метод SBaS требует не менее трех изображений, а метод PS не менее тридцати. Два последних метода позволяют оценить динамику изменений земной поверхности за длительный период времени (от нескольких месяцев до нескольких лет). Рассмотрим все эти методы подробнее.

Дифференциальная интерферометрия — классический попарный метод расчета площадных смещений. Включает в себя следующие этапы: формирование интерферограммы, фильтрация и расчет когерентности, развертка фазы, коррекция и уточнение орбит, пересчет фазы в смещения. На выходе мы получаем карту смещений земной поверхности.

Метод SBaS (Small Baseline subset) — расчет точных площадных смещений при помощи серии космических снимков с небольшими базовыми линиями. Включает следующие этапы: формирование интерферограммы с последующей фильтрацией и разверткой, коррекция орбитальных ошибок, первая инверсия, вторая инверсия (атмосферная коррекция) и орторектификация, геокодирование результатов обработки. На выходе получаем точечный векторный файл, представляющий собой карту средних скоростей изменения смещений земной поверхности.

Метод PS (Persistent Scatterers) — расчет смещений точечных целей, являющихся постоянными отражателями для радиолокационного спутника. Позволяет измерить детальные смещения на объектах инфраструктуры. Применяется, как правило, для территорий с городской местностью. Включает такие же этапы, как метод SBaS. На выходе так же

получаем карту средних скоростей изменения смещений поверхности [4–5].

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Сотрудниками Кемеровского филиала ФИЦ ИВТ на протяжении многих лет проводится геодинамический мониторинг горнопромышленных предприятий и городов Кузбасса. Кроме того, мониторинг проводился и для других субъектов России, например, Мурманской области, Красноярского края, Республики Саха. Рассмотрим некоторые примеры подробнее.

В качестве одно из объектов исследования был выбран Кийзасский угольный разрез (Кемеровская область), где в июне 2019 года произошел оползень. В результате были повреждены опоры девяти ЛЭП и перекрыто русло реки Большой Кийзас на 750 метров в длину и около пяти метров в высоту [6]. Для обработки использовалось 11 радарных изображений с космического аппарата Sentinel-1 за период апрель–июль 2019 года. В ходе обработки исходных изображений методом SBaS была построена ретроспективная карта средних скоростей изменения вертикальных смещений земной поверхности (рис. 2). На карте цифрой 1 обозначен участок, заполненный горными породами, образовавшийся после оползня, цифрой 2 — отвал разреза Кийзасский. Как видно из рис. 2, между участками 1 и 2 регистрируется провал, означающий сход горных пород с борта отвала. На участке 1 регистрируются положительные вертикальные смещения, связанные с увеличением высоты поверхности из-за схода горных пород с борта и дальнейшее их столкновением со склоном холма. Отдельно стоит отметить, что средние скорости смещений за период с 30 мая 2019 года по 11 июня 2019 года (оползень произошел ночью 7 июня) увеличились в три раза. Значения средних скоростей смещений за период наблюдения составили от -170 мм/год до $+200$ мм/год.

Для мониторинга смещений в городах особенно подходит метод PS, т.к. различного рода здания и сооружения являются хорошими

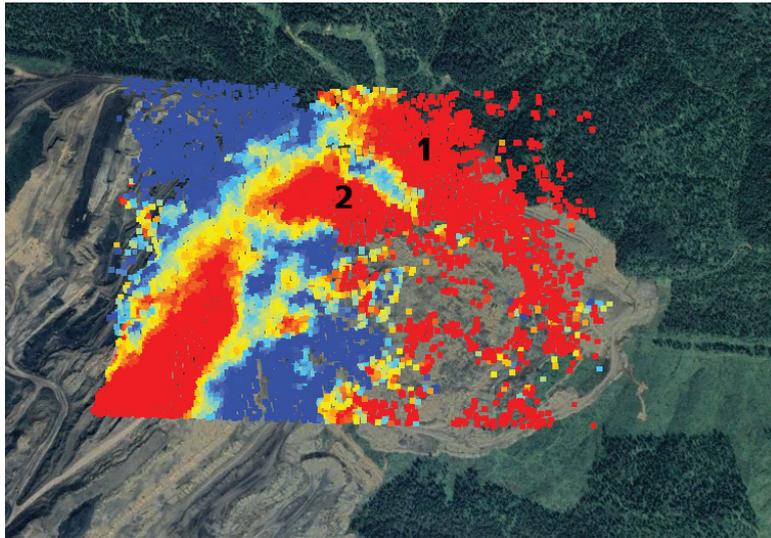


Рис. 2. Карта средних скоростей изменения вертикальных смещений земной поверхности, разрез Кийзасский, 2019 г.

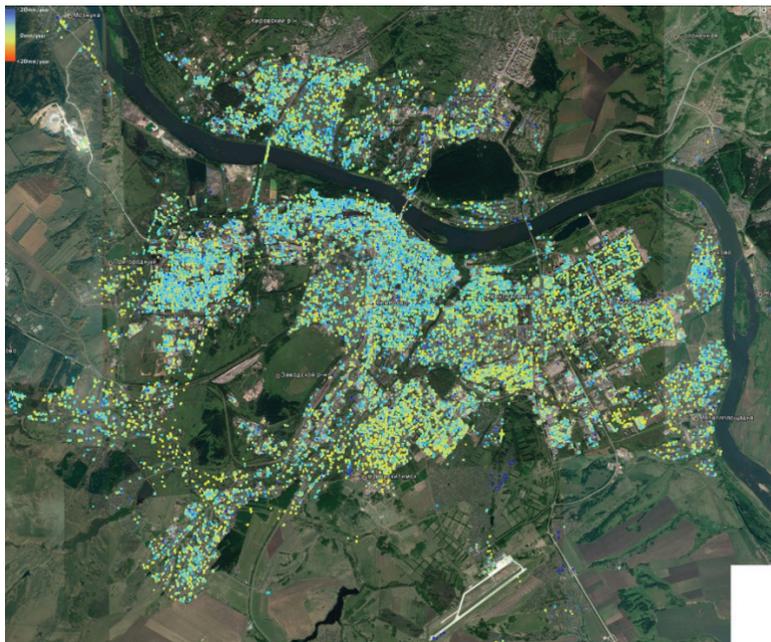


Рис. 3. Карта средних скоростей изменения вертикальных смещений земной поверхности, г. Кемерово, 2016–2017 гг.

постоянными отражателями. Так, например, в ходе обработки 30 радарных изображений территорий города Кемерово со спутника Sentinel-1 за период с ноября 2016 года по октябрь 2017 года была построена карта средних скоростей вертикальных смещений (рис. 3). Данная карта представляет векторный файл, содержащий 77572 точки, каждая из которых имеет ряд атрибутов: географические координаты, среднюю скорость смещения, дату, значение смещения на конкретную дату снимка

и др. Диапазон значения смещений составлял от -41 мм/год до 7 мм/год. В целом по городу значения смещений стабильны, просадки наблюдались только в местах строительства новых домов.

Все вышеописанные методы функционируют на основе обработки фазовой составляющей радарных изображений. Однако имеются алгоритмы, позволяющие определять изменения по амплитудной составляющей изображений. Одним из таких алгоритмов



Рис. 4. Примеры работы алгоритма REACTIV, изменения в г. Кемерово с 2018 по 2023 гг.

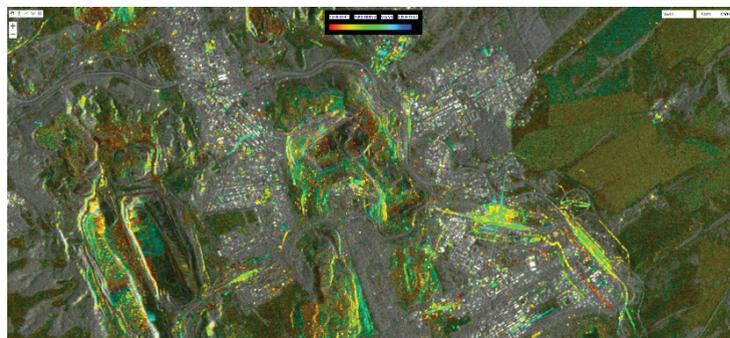


Рис. 5. Примеры работы алгоритма REACTIV, изменения на территории г. Киселевск с 2018 по 2023 гг.

является REACTIV [7]. Он позволяет визуализировать обнаруженные изменения на основе группы радарных изображений. Примеры работы алгоритма показаны на рис. 4–5. Насыщенность цвета показывает, насколько сильными были изменения, а оттенок цвета указывает на временной интервал, когда произошли изменения. Алгоритм реализован на облачной платформе Google Earth Engine. Это позволяет в течение нескольких секунд получать результаты без необходимости скачивания исходных радарных изображений.

КОМБИНИРОВАННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РАДАРНЫХ И МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ

В современном мире несмотря на развитие альтернативных источников, основным способом получения энергии остаётся сжигание ископаемых видов топлива. Значительную долю среди них составляют твёрдые виды топлива, которые помимо несомненных преимуществ обладают высокой пожароопасностью, в том числе из-за своей способности

самовозгораться [8]. Например, при определённых условиях температура угля может повыситься, что приведёт к самовозгоранию и последующему эндогенному пожару. Такие пожары происходят в угольных шахтах, карьерах, на складах угля и в отвалах породы. Они представляют серьёзную угрозу для людей и окружающей среды. В шахтах очаги самовозгорания могут вызвать взрывы горючих газов и угольной пыли, что приводит к гибели людей и разрушениям. Кроме того, большую опасность представляют токсичные газы, образующиеся при окислении и термическом разложении горючих веществ. Таким образом, люди чаще всего умирают при пожаре из-за отравления угарным газом. В процессе самовозгорания выделяются газы — углекислый газ и метан. Они попадают в атмосферу и усиливают парниковый эффект, что приводит к повышению температуры на планете. Токсичные вещества, которые образуются при эндогенных подземных пожарах, а также тепло от очагов самовозгорания вредят растениям и животным — они начинают хуже расти и размножаться или погибают. Чтобы

предотвратить разрушительное воздействие подземных пожаров на угольных месторождениях, нужно регулярно проводить мониторинг ситуации.

Один из современных методов мониторинга — использование данных со спутников. Например, мультиспектральные данные позволяют определить температуру поверхности, а радарные — рассчитать вертикальные смещения земной поверхности (просадки). В данной работе мы рассмотрим совместное использование таких данных и сделаем предположение о том, что подземные пожары могут возникать в местах с повышенной температурой поверхности и в зонах просадок [9].

В качестве объекта исследования была выбрана территория разреза «Бачатский». Для расчетов смещений земной поверхности было отобрано 8 радиолокационных изображений с космического аппарата Sentinel-1В за период с 01.05.2022 по 22.09.2022 гг. с периодичностью съемки от 12 до 24 дней. Для расчета температуры поверхности использовался мультиспектральный снимок со спутника Landsat-8 с датой съемки 09.08.2022.

На первом этапе производился расчет вертикальных смещений земной поверхности на исследуемом полигоне. В результате была построена карта средних скоростей изменения вертикальных смещений (рис. 6).

Красным цветом отмечены точки, где регистрируются поднятия земной поверхности, синим — просадки, желтым — стабильные участки. Значения смещений (максимальные и минимальные) составляют от -366 мм/год до $+299$ мм/год.

Затем мы рассчитали температуру по данным Landsat-8, следуя схеме, представленной на рис. 7. Все вычисления были выполнены в программе QGIS с использованием растрового калькулятора. В итоге была создана карта температур (рис. 8).

Максимальные значения температур ($30-31$ С_о) регистрируются на бортах отвалов. Минимальные ($11-12$ С_о) — на территориях с растительностью

Для определения зон возможных подземных пожаров карты температур и вертикальных смещений (рис. 6 и 8) совмещались.

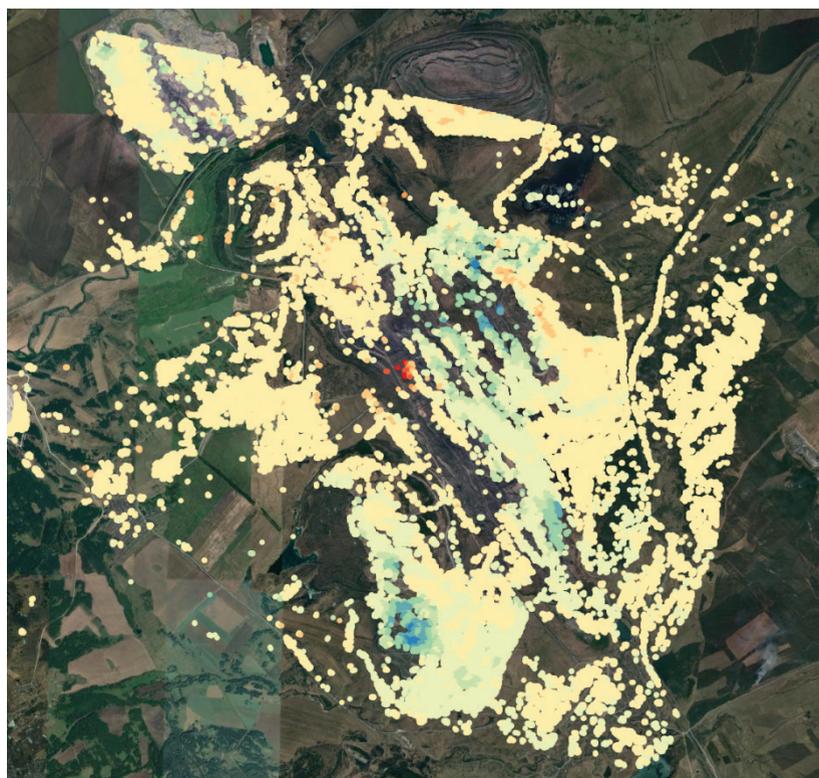


Рис. 6. Карта средних скоростей изменения вертикальных смещений, разрез «Бачатский», 1.05.2022–22.09.2022 г.

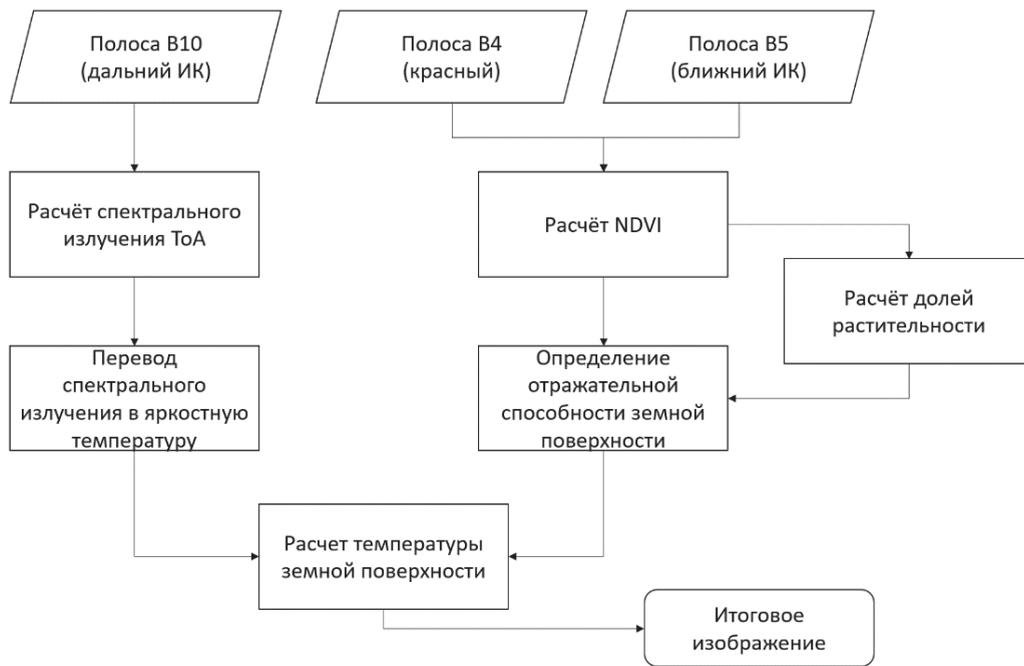


Рис. 7. Общая схема расчета температуры поверхности по данным Landsat-8.

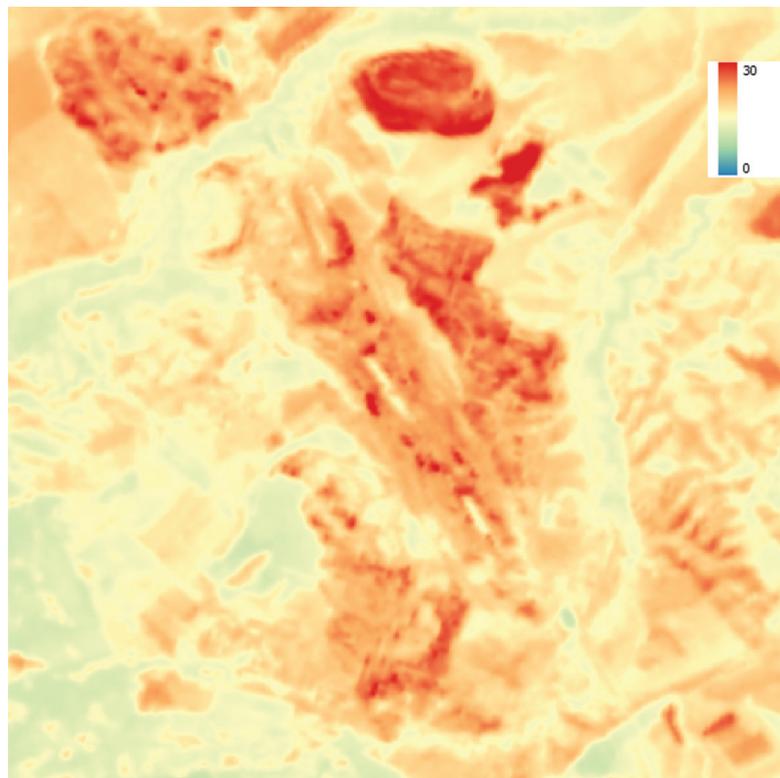


Рис. 8. Карта температур поверхности, разрез «Бачатский», 09.08.2022 г. (значения в градусах Цельсия)

Полученное комбинированное изображение представлено на рис. 9.

В результате были обнаружены две зоны (1 и 2 на рис. 9), в которых одновременно

фиксируются просадки земной поверхности и повышенные температуры. Оба участка расположены на склонах отвалов. Значения обоих параметров приведены в табл. 1.

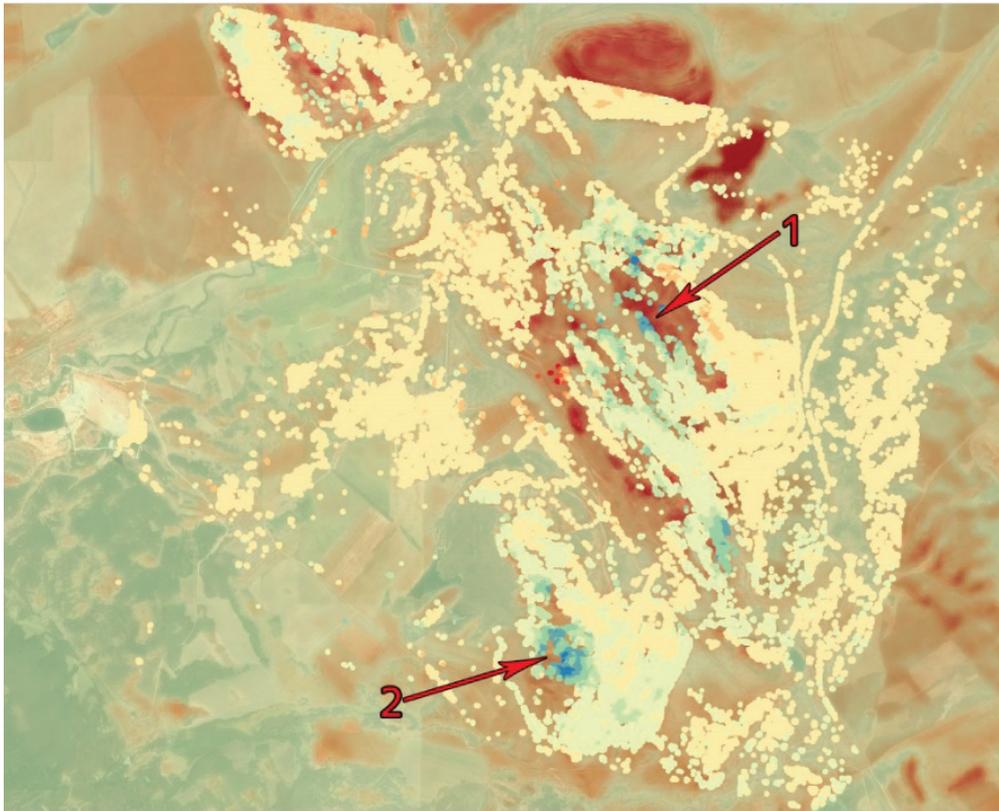


Рис. 9. Комбинированное изображение карты температуры и карты средних скоростей изменения вертикальных смещений. Разрез «Бачатский»

Таблица 1
Значения температуры
и средний скорости изменения смещений

№ участка	Температура (С°)	Средняя скорость изменения вертикальных смещений (мм/год)
1	29	-290
2	24	-350

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, как показали наши многолетние исследования, применение методов радарной интерферометрии является эффективным средством решения разнообразных задач мониторинга, оценки геомеханических и термодинамических процессов, особенно в районах с интенсивными горными работами.

Помимо этого, сочетание радарных и мультиспектральных данных даёт возможность

получать новые сведения о процессах, которые происходят в земной коре. В частности, такой метод позволяет выявить области возможного подземного пожара в местах добычи угля. Впоследствии подобный термогеомеханический мониторинг может послужить основой для разработки мер по повышению безопасности горных работ.

Отметим, что в настоящее время в Кемеровском филиале ФИЦ ИВТ разработан новый подход к комплексной обработке потоков радарных и мультиспектральных данных, основанный на Docker-конвейере, позволяющий в значительной степени автоматизировать процессы обработки информации, что существенно упрощает технологию обработки радарных снимков для пользователей

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00148, <https://rscf.ru/project/23-17-00148/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Угольная отрасль [Электронный ресурс]: URL: <https://mupk42.ru/ru/industry/> (дата обращения: 27.06.2024).

Мусихин В. В. Мониторинг процессов оседаний земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук.: 25.00.16. Пермь. 2012. 146 с.

Барях А. А., Тенисон Л. О., Самоделкина Н. А. К определению горизонтальных деформаций подработанных территорий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11. С. 5–18

Кантемиров Ю. И. Краткие теоретические основы радарной интерферометрии ее многопроходных вариаций PS и SBaS // Геоматика. 2012. № 1. С. 22–26

Rosen P. A., Hensley S., Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodriguez E., Goldstein R.M. Synthetic aperture radar interferometry // Proc. IEEE. No. 88(3). 2000. P. 333–382

Миков Л. С., Попов С. Е. Определение деформации земной поверхности на разрезе «Кийзасский» по данным SENTINEL-1 // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы VII Международной научной конференции. 2020. Красноярск. С. 262–264.

Elise Colin Koeniguer, Jean-Marie Nicolas, Beatrice Pinel-Puysegur, J.-M. Lagrange and Fabrice Janez. Visualisation des changements sur s'eries temporelles radar: m'ethode REACTIV 'evalue'e `a l'echelle mondiale sous Google Earth Engine // Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection. 2018. P. 99–108

Г. В. Стась, А.В. Волберг, Е.В. Смирнова, М.П. Ганин Риск самовозгорания угля и опасность эндогенных пожаров на шахтах Кузбасса // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2017. № 3. С. 93–103

J. Liu, Y. Wang, S. Yan, F. Zhao, Y. Li, L. Dang Underground Coal Fire Detection and Monitoring Based on Landsat-8 and Sentinel-1 Data Sets in Miquan Fire Area, XinJiang // Remote Sensing. 2021. 24 p.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.87.44.004

UDC 528.852.8:528.8.044.1

© L. S. Mikov, V. P. Potapov, 2024

L. S. MIKOV

Junior Researcher

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Kemerovo

e-mail: mikov@ict.sbras.ru

V. P. Potapov

Doctor of Engineering Sciences, Professor

Leading Researcher

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Kemerovo

e-mail: vadimptpv@gmail.com

THE USE OF RADAR INTERFEROMETRY FOR A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF GEOMECHANICAL AND THERMODYNAMIC PROCESSES (USING THE EXAMPLE OF KUZBASS)

The paper considers the issues of a comprehensive assessment of geomechanical and thermodynamic processes in the Kuzbass region. It demonstrates the use of multi-pass series of satellite radar data from the Sentinel-1 spacecraft using radar interferometry methods to determine the average rates of change in vertical displacements of the earth's surface. Examples of using the REACTIV algorithm based on the amplitude component of radar images are given. The results of the combined use of radar and multispectral data are presented.

Keywords: RADAR DATA, MULTISPECTRAL DATA, RADAR INTERFEROMETRY, SATELLITE RADAR MONITORING, EARTH SURFACE DISPLACEMENTS, SMALL BASELINE SUBSET, PERSISTENT SCATTERER METHOD, DIFFERENTIAL INTERFEROMETRY.

Acknowledgements. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-17-00148, <https://rscf.ru/project/23-17-00148/>.

REFERENCES

1. The coal industry [Electronic resource]: URL: <https://mupk42.ru/ru/industry/> (accessed: 27.06.2024). [In Russ.].
2. Musikhin V. V. Monitoring of surface subsidence processes in areas of intensive subsoil use based on interferometric processing of space radar sounding data: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 25.00.16. Perm, 2012. 146 p. [In Russ.]
3. Baryakh A. A., Tenson L. O., Samodelkina N. A. On the determination of horizontal deformations of undermined territories // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2021. No. 11. P. 5–18. [In Russ.]
4. Kantemirov Yu. I. Brief theoretical foundations of radar interferometry and its multipass PS and SBAS variations // Geomatics. 2012. No. 1. P. 22–26.
5. Rosen P. A., Hensley S., Joughin I. R., Li F. K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M. Synthetic aperture radar interferometry // Proc. IEEE 88(3). 2000. P. 333–382
6. Mikov L. S., Popov S. E. Determination of the deformation of the earth's surface at the Kiyzassky section according to SENTINEL-1 data // Regional problems of remote sensing of the Earth: materials of the VII International Scientific Conference. Krasnoyarsk, 2020. P. 262–264. [In Russ.].
7. Elise Colin Koeniguer, Jean-Marie Nicolas, Beatrice Pinel-Puysegur, J.-M. Lagrange and Fabrice Janez. Visualisation des changements sur s'eries temporelles radar: m'ethode REACTIV 'evalu'ee `a l'echelle mondiale sous Google Earth Engine // Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection. 2018. P. 99–108
8. Stas G. V., Volberg A. V., Smirnova E. V., Ganin M. P. The risk of spontaneous coal combustion and the danger of endogenous fires in the mines of Kuzbass // News TulSU. Earth Sciences. 2017. No. 3. P. 93–103. [In Russ.].
9. J. Liu, Y. Wang, S. Yan, F. Zhao, Y. Li, L. Dang Underground Coal Fire Detection and Monitoring Based on Landsat-8 and Sentinel-1 Data Sets in Miqan Fire Area, XinJiang // Remote Sensing. 2021. 24 p.