

УДК 550.31

МОНИТОРИНГ ОСЕДАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ г. БЕРЕЗНИКИ (ПЕРМСКИЙ КРАЙ) МЕТОДАМИ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ. I. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

© 2021 г. И.П. Бабаянц¹, А.А. Барях², М.С. Волкова¹, В.О. Михайлов¹,
Е.П. Тимошкина¹, С.А. Хайретдинов¹

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

Автор для переписки: М.С. Волкова (e-mail: msvolkova6177@gmail.com)

Обсуждаются методические вопросы проведения мониторинга оседаний земной поверхности над горными выработками в г. Березники (Пермский край) с использованием методов спутниковой радарной интерферометрии – дифференциальной спутниковой интерферометрии *DInSAR* и устойчивых отражателей. Оседания грунта, вызванные горными работами, происходили в этом районе в течение многих лет, но при этом их скорость оставалась небольшой. Ситуация резко изменилась в 2006 г., когда произошла крупнейшая в мировой практике разработки водорастворимых руд авария – был затоплен рудник Первого Березниковского калийного рудоуправления, расположенный непосредственно под г. Березники с населением около 150 тыс. человек, который является вторым по величине городом Пермского края.

В предлагаемой статье приведены оценки смещений земной поверхности методом дифференциальной спутниковой интерферометрии *DInSAR*, основанным на интерферометрической обработке пар снимков, выполненных спутником *TerraSAR-X* с 11-дневным интервалом. Показано, что оседания, происходящие в настоящее время в районе г. Березники, устойчиво фиксируются по спутниковым данным, позволяя вести мониторинг смещений с минимальной задержкой во времени. Смещения в основных областях оседаний за 22 и 33 дня уверенно выделяются по спутниковым снимкам на фоне шумов разного рода. Расчеты смещений по парам снимков со спутника *Sentinel-1B*, имеющего большую длину волны, оказались не столь устойчивыми. Из-за более низкой когерентности карты смещений, полученные по снимкам этого спутника, менее детальны, поэтому снимки со спутника *Sentinel-1B* рекомендуется использовать для расчета временных рядов смещений методами устойчивых отражателей. Оценка оседаний в пределах рассматриваемой территории указанными методами будет представлена авторами в следующей статье.

Полученные поля смещений хорошо согласуются с данными наземной геодезии. Результаты расчетов позволяют заключить, что, несмотря на продолжающееся оседание земной поверхности над провалами на исследуемой территории, меры, принятые для стабилизации процесса, в целом работают эффективно.

Ключевые слова: спутниковая радарная интерферометрия, мониторинг оседаний, калийные рудники, Березники, провалы.

Введение

Расположенное в Пермском крае Верхнекамское месторождение калийных и магниевых солей является крупнейшим в нашей стране и входит в число самых крупных разрабатываемых соляных месторождений мира. Разведанная соленосная толща протягивается на 135 км с севера на юг и на 40 км с востока на запад. Основные разработки ведутся на левом берегу р. Кама в расположенных непосредственно над соляными шахтами городах Соликамск и Березники. Главная задача при подземной разработке

соляных месторождений – сохранение целостности водонепроницаемой пачки пород, которая называется водозащитной толщей и находится между кровлей верхнего отрабатываемого пласта и подошвой водоносного горизонта. При нарушении сплошности этой толщи пресные или слабоминерализованные воды начинают растворять соляные породы и размывать трещины. Это усиливает водоприток и, в конечном счете, приводит к затоплению рудника. Для сохранения целостности водозащитной толщи на верхнекамских месторождениях применяется камерная система разработки, при которой вышележащая толща пород поддерживается регулярно оставляемыми междукамерными целиками [Барях, Самоделкина, 2017].

Оседания грунта, вызванные горными работами, в районе г. Березники происходили многие годы, но их скорость долгое время оставалась небольшой. Ситуация резко изменилась в 2006 г., когда произошла крупнейшая в мировой практике разработки водорастворимых руд авария – был затоплен рудник Первого Березниковского калийного рудоуправления, расположенный непосредственно под г. Березники, вторым по величине городом Пермского края с населением около 150 тыс. человек [Барях, Красноштейн, Санфиоров, 2009].

После аварии был существенно расширен комплекс мер по обеспечению сохранности водозащитной толщи и контролю эффективности проводимых в связи с этим работ. Регулярно выполняются повторные геодезические и гравиметрические измерения, регистрируется техногенная сейсмичность. Выполняется численное геомеханическое моделирование, разработана и реализована система комплексного мониторинга, позволяющая принимать превентивные решения по защите рудников и расположенных в зоне их влияния селитебных территорий [Барях, Санфиоров, Дягилев, 2013]. Ранее [Гневанов, Шамин, 2012; Михайлов и др., 2019; Samsonov, Baryakh, 2020] для территории г. Березники методами радарной спутниковой интерферометрии выполнялись оценки полей смещений, в частности, в течение нескольких лет осуществлялся регулярный спутниковый мониторинг [Буш и др., 2009], который после длительного перерыва был возобновлен в 2020 г. Принимая во внимание, что к настоящему времени наметился значительный прогресс в области спутниковой радарной интерферометрии, включая запуск новой серии спутников *Sentinel*, и поскольку в последние годы процесс оседания мог существенно измениться, возникла задача уточнения методики проведения мониторинга и ее практического опробования на территории г. Березники.

В данной статье мы кратко напомним основные принципы спутниковой интерферометрии, после чего рассмотрим методику проведения мониторинга территории г. Березники и некоторые результаты анализа пар радарных снимков со спутника *TerraSAR-X*, полученные в 2020 г., а также сопоставим полученные смещения с данными наземных измерений. Анализ временных рядов, в том числе с использованием снимков со спутников *Sentinel-1*, будет рассмотрен в следующей публикации.

Спутниковая радарная интерферометрия

Спутниковая радарная интерферометрия (РСА интерферометрия, англоязычный термин – *SAR*) применяется для решения широкого круга задач, в том числе для мониторинга смещений природных и техногенных объектов. Спутниковые снимки, выполненные радаром с синтезированной апертурой, позволяют строить высокоточные цифровые модели рельефа и оценивать смещения земной поверхности, произошедшие за время между повторными съемками [Hanssen, 2001]. В отличие от оптической съемки, РСА интерферометрия является активным методом – радарная антенна излучает электромагнитный сигнал под некоторым углом к вертикали и принимает сигнал,

отраженный от объектов на земной поверхности. Радарный снимок представляет собой матрицу комплексных чисел, характеризующих амплитуду и фазу радарного сигнала, отраженного от некоторого элемента разрешения (пикселя). Оценка смещений выполняется обычно путем расчета парной интерферограммы, которая характеризует разность фаз сигналов, отраженных от объектов в пределах одного и того же пикселя при первой и второй съемке. Поскольку спутниковую съемку невозможно дважды выполнить из одной и той же точки, вводится поправка на расстояние между точками съемки, для корректного введения которой необходимо знание цифровой модели рельефа. После фильтрации эффектов, связанных с влиянием атмосферы, шумов различной природы, ошибок задания орбит и цифровой модели рельефа, остается разность фаз, вызванная смещением отражающей площадки в направлении распространения радарного сигнала, называемого *LOS (Line-Of-Sight)* за время между повторными съемками. При этом поле фазовых смещений свернуто по модулю 2π , и для получения смещений в единицах длины необходимо выполнить фазовую развертку, т.е. прибавить необходимое число полных периодов, после чего, зная длину волны электромагнитного излучения, перевести фазовые смещения в линейную меру.

РСА интерферометрия позволяет получать снимки в любое время суток. Длина волны, на которой работают радары, выбирается так, чтобы минимизировать влияние атмосферы. Тем не менее, процессы поглощения и рассеяния электромагнитного излучения, особенно в облачных покровах, вносят погрешности, которые необходимо устранять на этапе обработки пар снимков. В частности, атмосферные процессы ухудшают когерентность снимков, которая является мерой корреляции фазовых значений двух сравниваемых снимков. Величина когерентности меняется от 1 для когерентных областей до 0 для некогерентных. При обработке снимков устанавливается порог когерентности, обычно составляющий 0.2–0.3. Области с когерентностью ниже порога в обработку не включаются. Процесс развертки предполагает, что поле смещений является гладким на пространственных масштабах порядка размера пикселя. Если в соседних пикселях разница смещений превосходит половину длины волны излучения спутника (для различных спутников она меняется от 3.1 до 23.4 см), то при развертке этот скачок будет сглажен. Корреляция снимков полностью теряется в областях больших смещений, не позволяя оценить их величину. Выбор методики проведения мониторинга, спутника и интервалов съемки определяются исходя из имеющихся данных о поле смещений в исследуемой области. При обработке и интерпретации полей смещений, полученных методами РСА интерферометрии, важно использовать всю имеющуюся дополнительную информацию об исследуемых объектах и процессах.

Анализ пар радарных снимков (дифференциальная РСА интерферометрия – *DInSAR*) позволяет изучать разнообразные природные процессы, такие как смещения в областях землетрясений, на оползневых склонах, динамика ледников и лавовых потоков, внедрение магматического материала и др. Среди возможных техногенных приложений такого анализа отметим мониторинг устойчивости мостов, дамб, смещений земной поверхности над тоннелями, горными выработками, подземными хранилищами газа, в областях разработки нефтегазовых месторождений (см. обзор в [Верба и др., 2010; Hanssen, 2001]).

Одна из проблем метода дифференциальной интерферометрии связана с тем, что при изучении медленных, длительно развивающихся процессов для достижения хорошего соотношения сигнал/шум необходимо использование снимков, выполненных с большим временным промежутком. При этом на больших интервалах времени корреляция между снимками часто теряется. Эта так называемая временная декорреляция, связана с изменениями ландшафта, растительности, снежного покрова и динамикой

других процессов. Поэтому следующим шагом в развитии РСА интерферометрии стало создание модификаций методов, основанных на поиске и анализе смещений – методов устойчивых отражателей (*PS* от *Persistent Scatterer*). Основная идея этих методов, обозначаемых в англоязычной литературе как *PS-InSAR*, состоит в одновременном анализе серии парных интерферограмм, на которых выделяются для дальнейшего рассмотрения только пиксели, характеризующиеся некоторым “устойчивым поведением” [Ferretti, Prati, Rocca, 2001]. Методы устойчивых отражателей позволяют анализировать медленные смещения, развивающиеся в течение длительного времени.

Для исследования смещений в районе г. Березники авторами были использованы обе технологии. В данной работе приведены результаты, полученные методом дифференциальной РСА интерферометрии; оценка оседаний земной поверхности методами устойчивых отражателей будет рассмотрена в следующей статье.

Использованные радарные снимки и методы обработки

Авторами использовались снимки, выполненные спутниками *TerraSAR-X* Космического агентства Германии *Airbus Defence and Space GmbH* и *Sentinel* Европейского космического агентства (таблица).

Перечень снимков, использованных в настоящей работе, с указанием даты съемки

№ снимка	<i>TerraSAR-X</i>	<i>Sentinel-1B</i>	№ снимка	<i>TerraSAR-X</i>	<i>Sentinel-1B</i>
1	28.04.2020	03.05.2020	10	05.08.2020	12.09.2020
2	09.05.2020	15.05.2020	11	16.08.2020	24.09.2020
3	20.05.2020	27.05.2020	12	27.08.2020	06.10.2020
4	31.05.2020	20.06.2020	13	07.09.2020	18.10.2020
5	11.06.2020	02.07.2020	14	18.09.2020	
6	22.06.2020	14.07.2020	15	29.09.2020	
7	03.07.2020	26.07.2020	16	10.10.2020	
8	14.07.2020	07.08.2020	17	21.10.2020	
9	25.07.2020	19.08.2020	18	01.11.2020	

Спутники, выполняющие радарную съемку, работают, в основном, в одном из трех частотных диапазонов – коротковолновом *X*-диапазоне с длиной волны $\lambda=3.1$ см, средневолновом *C*-диапазоне с $\lambda=5.6$ см, длинноволновом *L*-диапазоне с $\lambda=23.4$ см. В наших исследованиях использовались имеющие высокое пространственное разрешение снимки со спутника *TerraSAR-X*, работающего в *X*-диапазоне. Размер элемента разрешения (пикселя) перпендикулярно орбите составляет 0.9 м, вдоль направления полета – 1.9 м. Съемка территории выполнялась с 28.04 по 01.11.2020 г. с минимально возможным интервалом в 11 дней; размер снимка равен примерно 30 на 50 км. Всего от агентства *Airbus Defence and Space GmbH* в 2020 г. было получено 18 снимков с нисходящей орбиты трека 61D в режиме *StripMap*.

Коротковолновые снимки наиболее подвержены влиянию разного рода помех, в первую очередь, атмосферных. Для подавления высокочастотных помех выполнялось пространственное осреднение перпендикулярно орбите, в результате чего размер пикселя стал равен 1.8×1.9 м.

Для регулярного анализа смещений использовались парные интерферограммы, рассчитанные с интервалом 11 и 22 дня, т.е. для двух ближайших по времени снимков и через один. Также путем суммирования результатов за 11 и 22 дня регулярно рассчитывались поля смещений за 33 дня. Такая стратегия была принята потому, что на

большей части исследуемой территории смещения за 11 дней невелики и связанная с ними разность фаз отраженных сигналов находится на уровне шумов. На интервалах 22 и 33 дня соотношение сигнал/шум существенно выше.

Использованные в данной работе снимки со спутника *Sentinel-1B* Европейского космического агентства, которые покрывают обширную область вокруг г. Березники, выполнены в *S*-диапазоне с 12-дневным интервалом. В съемке имелись перерывы, в связи с чем за период с 3.05 по 18.10.2020 г. от Европейского космического агентства получено 13 снимков с нисходящей орбиты трека 35D. Снимки с этого спутника имеют меньшее разрешение (размер пикселя перпендикулярно орбите 2.32 м, вдоль орбиты 13.9 м.), но более устойчивы к атмосферным помехам; размер снимка 150 на 250 км.

Анализ полей смещений

Методами РСА интерферометрии смещения оцениваются по разности фаз спутниковых сигналов, отраженных от одного и того же объекта при повторной съемке. В результате, определяются смещения отражающего объекта вдоль направления зондирующего луча, т.е. оценивается проекция вектора смещений на направление на спутник (*LOS*). Обозначим через U_e , U_n , и U_z компоненты вектора смещений на восток, север и по вертикали, θ – угол наклона зондирующего луча к вертикали, β – азимут орбиты, который отсчитывается от направления на север по часовой стрелке. Тогда смещение в направлении на спутник будет определяться как [Hanssen, 2001]

$$U_{LOS} = U_z \cos \theta + \sin \theta (U_n \sin \beta - U_e \cos \beta); \quad (1)$$

здесь ось Oz направлена вверх.

Для нисходящей орбиты спутника *TerraSAR-X* азимут орбиты $\beta=187.44^\circ$, средний угол наклона зондирующего луча $\theta=35.4^\circ$ и, следовательно,

$$U_{LOS} = 0.815 \cdot U_z - 0.075 \cdot U_n + 0.574 \cdot U_e. \quad (2)$$

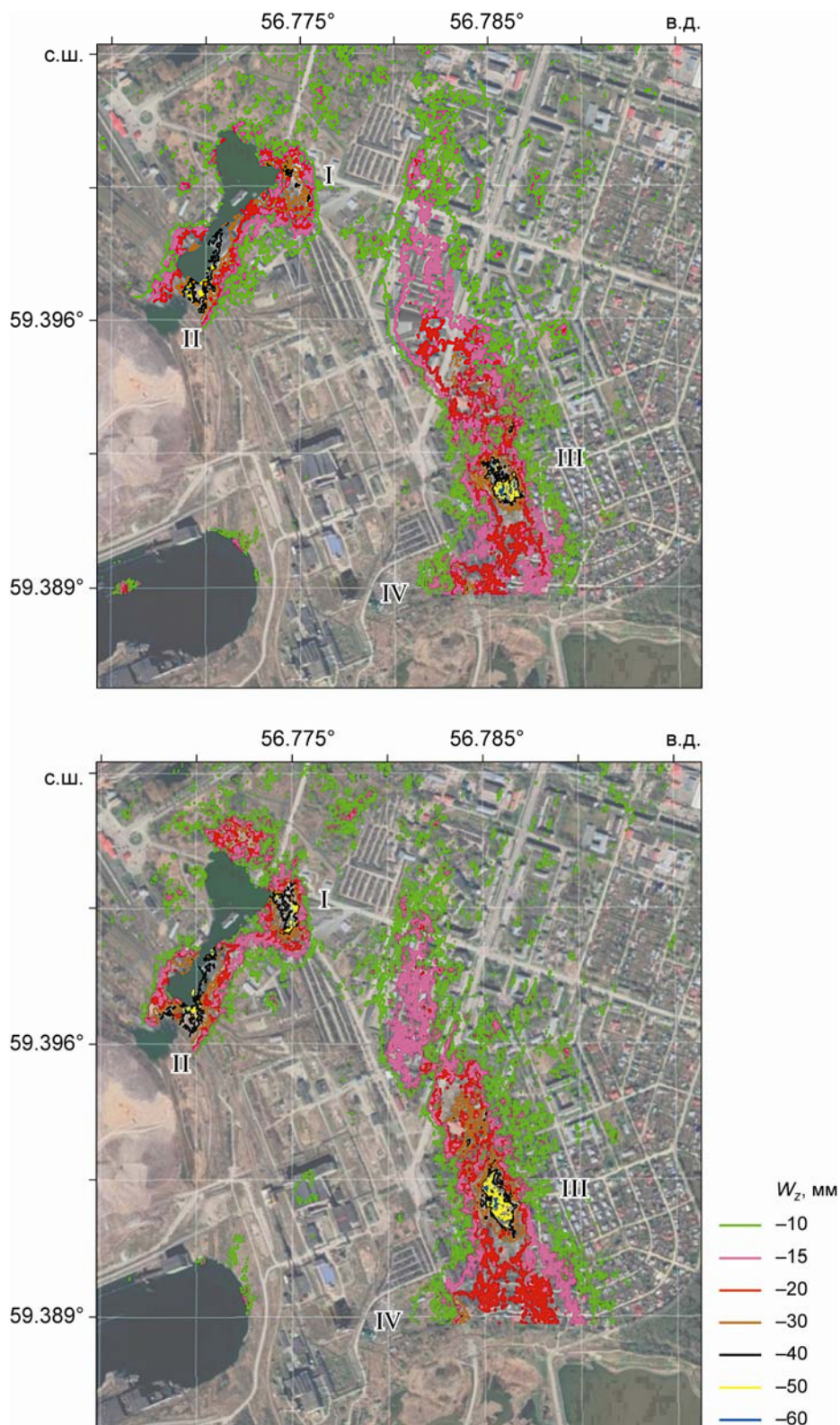
Для орбит спутников *Sentinel-1* – $\beta=188.18^\circ$, $\theta=38.77^\circ$, откуда получаем

$$U_{LOS} = 0.780 \cdot U_z - 0.09 \cdot U_n + 0.620 \cdot U_e. \quad (3)$$

Очевидно, что по известным U_{LOS} невозможно определить три компоненты вектора смещений, имея одно уравнение. Спутник снимает одну и ту же область, когда летит относительно наблюдателя на Земле с юга на север (восходящая орбита, *ascending*, *A*) и с севера на юг (нисходящая орбита, *descending*, *D*). Если имеются снимки с обеих орбит или с двух спутников с различной геометрией съемки, то возникает два уравнения с тремя неизвестными, которые также не имеют единственного решения. Однако, поскольку смещения на север входят в уравнения (2)–(3) с небольшим весом, то при наличии данных с двух орбит смещениями на север часто пренебрегают и определяют смещения по вертикали и на восток. Существуют технологии восстановления трех компонент векторов смещений на основе численной модели исследуемого процесса (описание методики решения для областей землетрясений, оползневых склонов, вулканов, нефтегазовых месторождений см. в [Михайлов и др., 2010, 2012, 2014, 2020]). В случаях, когда есть основания считать горизонтальные смещения малыми по сравнению с вертикальными, полагая в (2)–(3) U_e и U_n равными нулю, можно определить смещения U_z , которые будем называть субвертикальными, обозначив их как W_z .

Реальные поля смещений (сдвигения) над шахтными выработками содержат и горизонтальные и вертикальные компоненты. В центре мульд сдвигения горизонтальная компонента обращается в ноль, поэтому в эпицентральных областях мульд субвертикальные смещения должны быть близки к вертикальным.

Карты смещений W_z для западной части г. Березники от провалов у железнодорожного вокзала до южной границы города, полученные по снимкам спутника *TerraSAR-X* за два разных периода, представлены на рис. 1: слева показаны смещения за период с 25.07 по 27.08. 2020 г. (снимки №№ 9–12 в таблице), справа – с 29.09 по 01.11.2020 г. (снимки №№ 15–18 в таблице).



Согласно спутниковым данным максимальные смещения произошли на территории провалов в районе железнодорожного вокзала – на ее северо-восточном краю вблизи автодорожного кольца (см. рис. 1, область I), а также на южном и юго-восточном борту провалов (там же, область II). В обоих случаях за 33 дня смещения W_z превысили 50 мм. Вторая область значительных оседаний находится на территории провала № 5 (см. рис. 1, область III) – здесь за 33 дня оседания превзошли 60 мм (к сожалению, эта область не видна на представленном рисунке из-за его мелкого масштаба). Названная область протягивается в северо-западном направлении; оседания в ней за 33 дня составили 15 мм. К западу от области III располагается территория с низкой когерентностью, где небольшие оседания удалось зафиксировать только на отдельных зданиях Березниковского рудоуправления.

В северо-восточной части рассматриваемой территории оседания за 33 дня не превосходят 10 мм. Пиксели, в которых обнаружены эти смещения, в основном, приурочены к скверам или грунтовым участкам между домами. Отметим, что смещения амплитудой 10–15 мм находятся на пределе точности и должны быть верифицированы методами устойчивых отражателей или наземными геодезическими измерениями.

При сопоставлении фрагментов рис. 1 прослеживается устойчивость поля смещений на исследуемой территории во времени.

Аналогичные величины оседаний получены и за предыдущие периоды, например, за период с 11.06 по 14.07.2020 г. Это позволяет заключить, что, несмотря на продолжающееся оседание провалов, меры, принятые для стабилизации процесса, в целом работают эффективно.

Мониторинг оседаний был выполнен также для территорий нескольких поселков, расположенных к югу от г. Березники. На рис. 2 приведена карта субвертикальных смещений W_z для трех из них, обозначенных цифрами 1, 2, 3 в кружках. Можно видеть, что оседания фиксируются вдоль широкой полосы, простирающейся с севера на юг.

Амплитуда оседаний за 33 дня в северной части поселков 1 и 2 достигает 30 мм, местами 40 мм. Далее на юг амплитуда уменьшается до 15–20 мм. Расчеты выполнялись для областей с когерентностью выше 0.2, поэтому смещения в лесных массивах и в пойме ручья между поселками 2 и 3 на рис. 2 отсутствуют.

Парные интерферограммы позволяют выполнять мониторинг процесса оседаний с небольшой задержкой по времени. Полученные результаты хорошо согласуются с данными наземных геодезических измерений, сопоставление с которыми будет рассмотрено ниже. Здесь отметим только, что спутниковый мониторинг позволяет рассчитывать поля смещений по мере получения радарных снимков, в частности, для спутников *TerraSAR* промежуток между снимками составляет 11 дней.

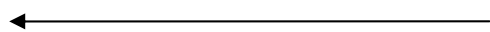


Рис. 1. Карты субвертикальных смещений W_z в западной части г. Березники, определенных по радарным снимкам спутника *TerraSAR-X* за периоды 25.07–27.08.2020 г. (*вверху*) и 29.09–01.11.2020 г. (*внизу*). Отмечены основные области оседаний: I, II – район у железнодорожного вокзала; III – район провала № 5; IV – локальный участок со смещениями до 30 мм. Карты совмещены с оптическим спутниковым снимком с ресурса *Google Earth Pro*. Здесь и на рис. 2, 4 изолинии разных значений в миллиметрах показаны разным цветом

Fig. 1. Maps of subvertical displacements W_z in the western part of Berezniki, defined from radar images of *TerraSAR-X* satellite for the periods of July 25 – August 27, 2020 (*above*) and September 29–November 11, 2020 (*below*). The main areas of subsidence are marked: I, II – the area near the railway station, III – sinkhole No. 5, IV – local area with displacements up to 30 mm. Maps are combined with an optical satellite image from the resource *Google Earth Pro*. Here and in Fig. 2, 4 contour lines of different values in millimeters are shown in different colors



Рис. 2. Карта субвертикальных смещений W_z за период 25.07–27.08.2020 г. на территории поселков 1, 2, 3, расположенных к югу от г. Березники. Оседания показаны в областях с когерентностью более 0.2

Fig. 2. Map of subvertical displacements W_z for the period from July 25–August 27, 2020 on the territory of settlements 1, 2, 3 located south of Berezniki. The subsidence is shown for areas with coherence more than 0.2

Важно, что при этом снимки покрывают обширные территории. Благодаря отмеченному, данные РСА интерферометрии – важное дополнение к данным наземных геодезических работ, проводимым по сети реперов или вдоль профилей с высокой точностью, но обычно не чаще двух–трех раз в год.

Оценка смещений за 187 дней методом суммирования парных интерферограмм

В тех случаях, когда смещения имеют длительный устойчивый характер, весьма эффективным оказывается суммирование смещений, получаемых по парным интерферограммам. Различного рода помехи (атмосферные эффекты, термический шум, ошибки, связанные с неточным знанием орбит и цифровой модели рельефа) не коррелируют во времени, поскольку зависят от состояния атмосферы, от точности определения конкретной орбиты в момент съемки.

Отметим, что ошибки, относящиеся к неточностям цифровой модели рельефа, также не коррелированы во времени, потому что они зависят от расстояния между спутниками при съемке первого и второго снимков. В результате, суммирование позволяет эффективно подавлять помехи и выделять полезный сигнал, особенно если его амплитуда со временем увеличивается. Посчитать смещения по паре снимков, выполненных с промежутком в 187 дней, не удастся из-за потери корреляции на больших временных интервалах.

Карта субвертикальных смещений для областей оседания I, II, расположенных к югу от железнодорожного вокзала (см. рис. 1), построенная по снимкам за период с 28.04 по 11.11.2020 г., представлена на рис. 3, *вверху* в сопоставлении с данными наземных геодезических измерений. Аналогичное сопоставление для более обширной территории западной части г. Березники в более мелком масштабе показано на рис. 3, *внизу*. В целом данные РСА интерферометрии и наземной геодезии в обоих случаях хорошо согласуются. Исключение составляет западный борт провала, где область смещений с амплитудой 200–250 мм/год, прослеженная по геодезическим данным, несколько смещена относительно соответствующей изолинии, построенной по данным РСА интерферометрии. Эти различия могут быть связаны с наличием здесь существенных горизонтальных смещений.

Скорости субвертикальных смещений по данным РСА интерферометрии за 187 дней на северо-восточном борту провала в районе автодорожного кольца (см. рис. 3) превосходят 400 мм/год, на юго-восточном борту – 600 мм/год. Южнее, в области оседаний IV, средние скорости смещений достигают 300 мм/год, в районе провала № 5 (область III) – 400 мм/год. Эти величины близки к данным геодезии.

В центральной части г. Березники области оседаний за 187 дней, превышающих 25 мм, наблюдаются в основном на природных ландшафтах – на территории парков и скверов (рис. 4, *вверху*).

В квартале, граница которого показана красным прямоугольником, в парке отмечены наибольшие оседания, но, вероятнее всего, они не связаны с подземными работами. Зафиксированные оседания не объединяются в единую мульду. Если здесь и имеются оседания, связанные с горными работами, то для их выявления необходим существенно больший интервал времени.

По данным за 187 дней были выделены две мульды оседаний на территории уже упоминаемых выше поселков 1, 2, 3 к югу от г. Березники (рис. 4, *внизу*). Одна из них протягивается от пруда вдоль границы поселков 1 и 2 примерно с севера на юг, где оседания сначала уменьшаются до 100 мм, а затем – до 60–80 мм. Вторая мульда оседаний с амплитудами 70–80 мм протягивается с запада на восток в средней части поселка 3. Оседания за 187 дней на южной окраине этого поселка достигают 150 мм. Они зафиксированы в основном на природных ландшафтах, поэтому рекомендуется их верификация по данным наземных геодезических наблюдений.

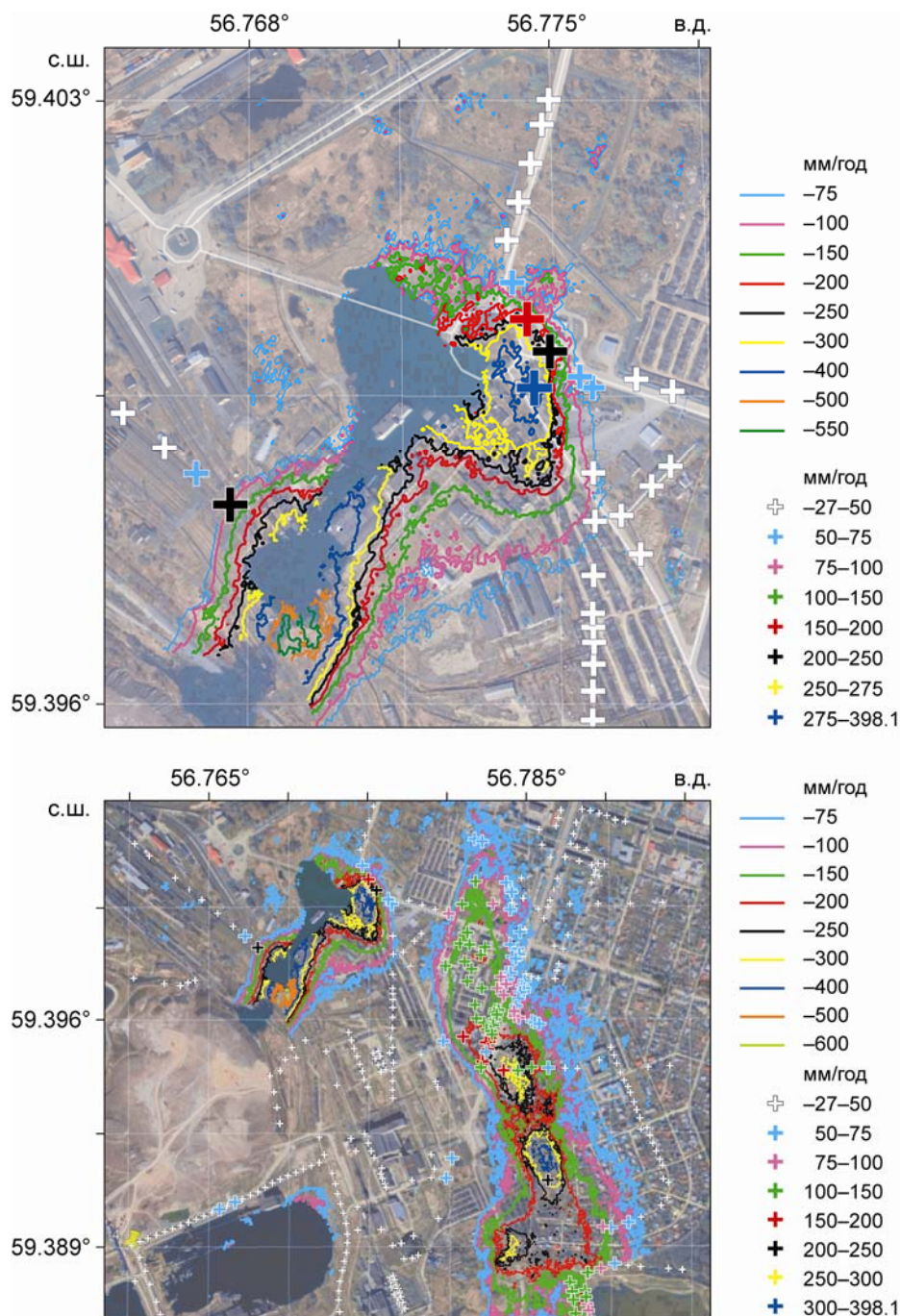


Рис. 3. Сравнение скоростей субвертикальных смещений W_z (изолинии в мм/год) и вертикальных смещений по геодезическим данным для района провала к югу от железнодорожного вокзала в г. Березники (*вверху*) и для западной части города (*внизу*). Смещения получены путем суммирования парных интерферограмм за 187 дней. В геодезических данных оседания положительные (мм/год). Они показаны крестами разного цвета; размер креста пропорционален скорости оседания

Fig. 3. Comparison of rates of subvertical displacement W_z (isoline in mm/yr) and vertical displacements by geodetic data for the sinkhole area, located to the south from the Berezniki railway station (*above*) and for the western part of the city (*below*). The displacements were calculated by summing paired interferograms for 187 days. In geodetic data subsidences are positive (mm/yr). They are shown with crosses of different color; the size of cross is proportional to subsidence rate

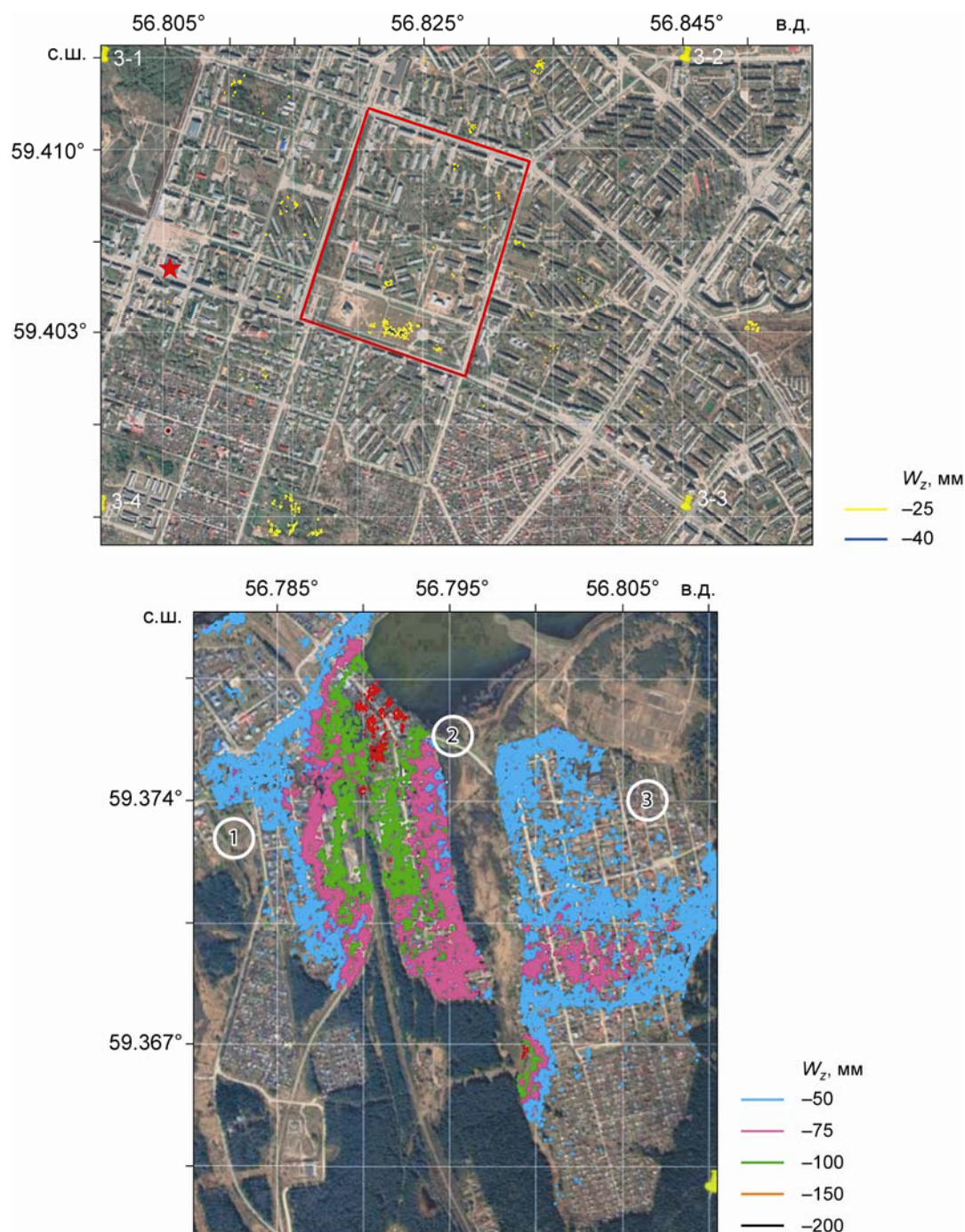


Рис. 4. Карты субвертикальных смещений W_z (изолинии в мм) за 187 дней с 28.04 по 01.11.2020 г., рассчитанных по парам снимков путем суммирования, для центральной части г. Березники (вверху) и для поселков 1, 2, 3 к югу от города (внизу). Прямоугольный контур на верхнем фрагменте – граница области оседаний с амплитудой до 40 мм, которые возможно, не связаны с горными работами; красной звездочкой отмечен участок, оседания в пределах которого приняты за 0

Fig. 4. Maps of subvertical displacements W_z (isolines in millimeters) for 187 days from April 28 to November 1, 2020 calculated from pairs of images by summation, for the central part of Berezniki (above) and for settlements 1, 2, 3 to the south of the city (below). On the upper fragment the rectangle shows an area of subsidence with an amplitude of up to 40 mm, that are probably not caused by mining activity; the red asterisk marks the area, where the subsidence is taken as 0

Выводы

Оседания земной поверхности, происходящие в настоящее время в районе г. Березники и на прилегающих территориях, устойчиво фиксируются методами дифференциальной РСА интерферометрии по парам снимков спутника *TerraSAR-X*, выполненных с интервалом в 11 дней, что позволяет вести мониторинг смещений с минимальной задержкой во времени. По названным снимкам смещения за 22 и 33 дня в основных областях оседаний уверенно выделяются на фоне шумов.

Оценки смещений по парам снимков спутника *Sentinel-1B* оказались не столь устойчивыми. Из-за более низкой когерентности карты смещений, полученные по снимкам этого спутника, менее детальны, в связи с чем они были использованы только для расчета временных рядов смещений методами устойчивых отражателей.

Оценки субвертикальных смещений W_z близки к данным наземной геодезии. Съемка с двух орбит дает два уравнения типа (1) с различными углами. Предполагая, что смещения на север невелики, авторы работы [Samsonov, Baryakh, 2020] определили горизонтальные смещения в восточном направлении. При этом ими использовались средние скорости смещений на спутник, определенные методами устойчивых отражателей по снимкам, выполненным с двух орбит спутником *Radarsat-2* в *C*-диапазоне. Максимальная величина горизонтальных смещений в восточном направлении составила 100 мм/год.

Вклад горизонтальных смещений в общее оседание земной поверхности определяется их направлением, при этом наиболее существенное влияние оказывают смещения в направлении восток–запад, как следует из формул (1)–(3). Пусть имеется изометричная мульда сдвижения ($U_z < 0$), на восточном борту которой горизонтальные смещения направлены на запад ($U_e < 0$), а на западном – на восток ($U_e > 0$). Для нисходящей орбиты горизонтальные смещения, направленные на восток, имеют обратный знак относительно U_z и уменьшают амплитуду U_{LOS} . Поэтому при пересчете в субвертикальные смещения амплитуда W_z на западном борту окажется меньше амплитуды истинного вертикального смещения U_z . Смещения в западном направлении увеличивают амплитуду смещений U_{LOS} , и амплитуда субвертикальных смещений на восточном борту становится больше реальных вертикальных оседаний. В результате, поле субвертикальных смещений оказывается несимметричным: на восточном борту мульды сдвижения (ближнем к нисходящей орбите спутника) изолинии сместятся в направлении от центра мульды, а на западном (дальнем от спутника) – к ее центру. С этим, возможно, связаны асимметрия карты оседаний W_z у провала в западной части г. Березники (см. рис. 3, *внизу*) и расхождения между геодезическими и интерферометрическими оценками.

На западном борту провала южнее железнодорожного вокзала (см. рис. 3, *вверху*) на геодезическом пункте, обозначенном черным крестом, зафиксировано оседание, составляющее 200–250 мм/год. Согласно спутниковым оценкам, приводимым в [Samsonov, Baryakh, 2020], здесь присутствует еще и горизонтальное смещение на восток около 100 мм/год. В таком случае величина U_{LOS} в этой области составит 106–146 мм/год, а величина субвертикальных оседаний – 130–180 мм/год. Эта величина близка к оценке субвертикальных смещений, равной в этой точке 100–150 мм/год (см. рис. 3, *внизу*). Как уже отмечалось, в центре мульды сдвижения субвертикальные смещения должны быть близки к вертикальным.

Получить оценки восточной компоненты смещений в районе г. Березники по данным с двух треков, как это сделано в [Samsonov, Baryakh, 2020], не удастся, так как в настоящее время для этой территории съемка с двух орбит не выполняется. Подобная съемка с двух орбит выполнялась здесь только в 2011–2014 гг. спутником *Radarsat-2*.

Данные спутниковой РСА интерферометрии – хорошее дополнение к данным наземной геодезии. Наземная геодезия более точна, дает результаты в областях с низкой когерентностью спутниковых снимков (леса, поймы рек), но проводится с большими интервалами по времени, с меньшей плотностью точек измерений и охватывает меньшие площади.

Спутниковые снимки выполняются с небольшим интервалом по времени; их использование позволяет следить за развитием оседаний на обширных территориях и оценивать смещения в областях, где наземные геодезические измерения не проводятся. Однако РСА интерферометрия не работает в зимний период при наличии снежного покрова, в лесных массивах и других областях с низкой когерентностью. Этим определяется важность выполнения работ обоими методами.

Представленные результаты, полученные в конкретных условиях мониторинга г. Березники, продемонстрировали высокую эффективность метода оценки смещений за длительные интервалы времени путем суммирования интерферограмм. Оценка оседаний земной поверхности методами устойчивых отражателей будет рассмотрена авторами в следующей статье.

Благодарности

Авторы признательны Космическому агентству Германии *Airbus Defence and Space GmbH* и Европейскому космическому агентству *ESA* за предоставленные снимки.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук и при поддержке гранта Российского научного фонда (грант № 19-77-30008).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Барях А.А., Красноштейн А.Е., Санфиоров И.А. Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2009. № 2. С.40–49.
- Барях А.А., Самоделкина Н.А. Геомеханическая оценка интенсивности деформационных процессов над затопленным калийным рудником // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 4. С.33–46.
- Барях А.А., Санфиоров И.А., Дягилев Р.А. Мониторинг последствий затопления калийного рудника // Горный журнал. 2013. № 6. С.34–39.
- Буш В., Хебель Х.П., Шаффер М., Вальтер Д., Барях А.А. Контроль оседаний подработанных территорий методами радарной интерферометрии // Маркшейдерия и недропользование. 2009. № 2. С.38–43.
- Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 675 с.
- Гневанов И.В., Шамин П.В. Оценка деформаций земной поверхности горных отводов ОАО “Уралкалий” в г. Березники методами радарной интерферометрии // Геоматика. 2012. № 1. С.56–60.

- Михайлов В.О., Волкова М.С., Тимошкина Е.П., Шапиро Н.М., Бабаянц И.П., Дмитриев П.Н., Хайретдинов С.А. Анализ смещений поверхности лавовых потоков Толбачинского трещинного извержения 2012–2013 г. методами спутниковой радарной интерферометрии // Геофизические исследования. 2020. Т. 21, № 4. С.21–34. doi.org/10.21455/gr2020.4-2
- Михайлов В.О., Киселева Е.А., Барях А.А., Исаев Ю.С., Смольянинова Е.И. Возможности мониторинга динамики развития оседаний земной поверхности на территории г. Березники по снимкам спутника Сентинель // XI Всероссийская школа-семинар с международным участием “Физические основы прогнозирования разрушения горных пород”: Тезисы докладов. Пермь: ГоИ УрО РАН, 2019. С.35–36.
- Михайлов В.О., Киселева Е.А., Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П. Оценка полного вектора смещений земной поверхности и техногенных объектов по данным радарной спутниковой интерферометрии для областей разработки месторождений нефти и газа // Геофизические исследования. 2012. Т. 13, № 3. С.5–17.
- Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б., Диаман М., Шапиро Н., Киселева Е.А., Тихоцкий С.А., Поляков С.А., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П. Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 // Физика Земли. 2010. № 2. С.3–16.
- Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Исаев Ю.С., Дорохин К.А., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А. Некоторые проблемы мониторинга оползневых процессов с использованием спутниковых радарных снимков с различной длиной волны на примере двух оползневых склонов в районе Большого Сочи // Физика Земли. 2014. № 4. С.120–130.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 2001. V. 39, N 1. P.8–20.
- Hanssen R. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 328 p.
- Samsonov S., Baryakh A. Estimation of Deformation Intensity above a Flooded Potash Mine Near Berezники (Perm Krai, Russia) with SAR Interferometry // Remote Sensing. 2020. V. 12, N 19. P.3215. doi: 10.3390/rs12193215

Сведения об авторах

БАБАЯНЦ Игорь Павлович – ведущий инженер, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1. Тел.: +7(903) 788-18-97. E-mail: pa81@yandex.ru

БАРЯХ Александр Абрамович – доктор технических наук, академик РАН, директор Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, заведующий лабораторией, Горный институт УрО РАН. 614990, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13а. Тел./факс: +7(342) 2-198-438. E-mail: bar@mi-perm.ru

ВОЛКОВА Мария Сергеевна – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-85-77. E-mail: msvolkova6177@gmail.com

МИХАЙЛОВ Валентин Олегович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-85-77. E-mail: mikh@ifz.ru

ТИМОШКИНА Елена Павловна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-85-77. E-mail: elena@timoshkin.ru

ХАЙРЕТДИНОВ Станислав Ахмедович – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-85-77. E-mail: khairtdinov-st@mail.ru

MONITORING OF SUBSIDENCE IN BEREZNIKI (PERM REGION) BY SAR INTERFEROMETRY: I. DIFFERENTIAL INTERFEROMETRY

I.P. Babayantz¹, A.A. Baryakh², M.S. Volkova¹, V.O. Mikhailov¹,
E.P. Timoshkina¹, S.A. Khairtdinov¹

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia*

Corresponding author: M.S. Volkova (e-mail: msvolkova6177@gmail.com)

Abstract. The paper discusses the methodological issues of SAR monitoring (differential satellite interferometry *DInSAR* and stable reflectors) of the ground surface subsidence over Berezniki potash mines (Perm region). The subsidence caused by mining works has occurred for many years, but its rate remained low for a long time. The situation changed dramatically in 2006, when the largest accident in the world practice of exploration of water-soluble ore-deposits occurred – the mine of the First Bereznikovski Potash Mining Administration was flooded. The mine was located directly under the town of Berezniki, the second largest city in the Perm district, with a population of about 150 thousand people.

We have estimated the displacements of the ground surface by the method of differential satellite interferometry *DInSAR*, based on the interferometric processing of pairs of *TerraSAR-X* satellite images, performed with 11-day interval. We demonstrated that satellite data steadily recovers the current subsidence in the territory of Berezniki. This allows monitoring of subsidence with minimal time delay. The displacements in the main subsidence areas for 22 and 33 days are confidently distinguished from SAR images against the background of various noises. Calculations of displacements based on pairs of the *Sentinel-1B* SAR images, which have a longer wavelength, turned out to be not stable enough. Due to the lower coherence, the displacement maps obtained from the images of this satellite are less detailed. Therefore, we recommend using the *Sentinel-1B* images for calculating the time series of displacements by the methods of persistent scatterers. The assessment of subsidence within the territory under consideration by the indicated methods will be presented by the authors in the next article.

The obtained subsidence fields are in good agreement with the ground geodesy data. The calculation results allow us to conclude that despite the continuing subsidence of the ground over the sinkholes, in general, the measures taken to stabilize the subsidence work effectively.

Keywords: SAR interferometry, monitoring of subsidence, potash mines, Berezniki, sinkholes.

Acknowledgements

The authors are grateful to the German Space Agency *Airbus Defense and Space GmbH* and to the European Space Agency *ESA* for the provided images.

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences and with the support of Russian Science Foundation (project no. 19-77-30008).

Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

References

- Baryakh A.A., Krasnoshtein A.E., Sanfirov I.A., Mining accidents: flooding of the First Bereznikovskiy potash mine, *Vestnik Permskogo nauchnogo tsentra* (Proceedings of the Perm Scientific Center), 2009, no. 2, pp. 40-49. [In Russian].
- Baryakh A., Samodelkina N., Geomechanical Estimation of Deformation Intensity above the Flooded Potash Mine, *Journal of Mining Science*, 2018, vol. 53, no. 4, pp. 630-642.
- Baryakh A.A., Sanfirov I.A., Dyagilev R.N., Monitoring the consequences of flooding a potash mine, *Gorniy Jurnal* (Mining Journal), 2013, no. 6, pp. 34-39. [In Russian].
- Bush V., Hebel H.P., Schaffer M., Walter D., Baryakh A., Control of underworked areas subsidence using the radar interferometry methods, *Marksheideriya I nedropol'zovanie* (Mine Surv. Subsurf. Use), 2009, no. 2, pp. 38-43. [In Russian].
- Ferretti A., Prati C., Rocca F., Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2001, vol. 39, no. 1, pp. 8-20.
- Gnevanov I.V., Shamin P.V., Assessment of deformations of the earth's surface of mining area of the "Uralkali" in the Berezniki city by methods of radar interferometry, *Geomatica* (Geomatics), 2012, no. 1, pp. 56-60. [In Russian].
- Hanssen R., *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, 328 p.
- Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Dmitriev P.N., Golubev V.I., Smol'yaninova E.I., Timoshkina E.P., Estimation of full vector of displacements of the Earth's surface and technogenic objects based on InSAR data applied to oil and gas production areas, *Geofizicheskie Issledovaniya* (Geophysical Research), 2012, vol. 13, no. 3, pp. 5-17. [In Russian].
- Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Baryakh A.A., Isaev Yu.S., Smol'yaninova E.A., On the possibilities of monitoring the dynamics of the development of subsidence of the earth's surface on the territory of Berezniki using images from the Sentinel satellite, in *XI-ya Vserossiiskaya shkola-seminar s mezhdunarodnym uchastiem "Fizicheskie osnovy prognozirovaniya razrusheniya gornyx porod": Tezisy dokladov* (11th All-Russian School-Seminar with International Participation "Physical Foundations of Forecasting Rock Fracture": Abstracts), Perm: GoI UrO RAN, 2019, pp. 35-36. [In Russian].
- Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Smol'yaninova E.I., Dmitriev P.N., Golubev V.I., Isaev Y.S., Dorokhin K.A., Timoshkina E.P., Khairetdinov S.A., Some problems of landslide monitoring using satellite radar imagery with different wavelengths: Case study of two landslides in the region of Greater Sochi, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 576-587.
- Mikhailov V.O., Nazaryan A.N., Smirnov V.B., Kiseleva E.A., Tikhotskii S.A., Smol'yaninova E.I., Timoshkina E.P., Polyakov S.A., Diamant M., Shapiro N., Joint inversion of the differential satellite interferometry and GPS data: a case study of Altai (Chuia) earthquake of September 27, 2003, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 91-103. DOI: 10.1134/S1069351310020011
- Mikhailov V.O., Volkova M.S., Timoshkina E.P., Shapiro N.M., Babayantz I.P., Dmitriev P.N., Khairetdinov S.A., Analysis of displacements of the lava flow surface of the 2012–2013 Tolbachik fissure eruption by SAR interferometry, *Geofizicheskie Issledovaniya* (Geophysical Research), 2020, vol. 21, no. 4, pp. 21-34. [In Russian]. <https://doi.org/10.21455/gr2020.4-2>
- Samsonov S., Baryakh A., Estimation of Deformation Intensity above a Flooded Potash Mine Near Berezniki (Perm Krai, Russia) with SAR Interferometry, *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 19, pp. 3215. doi: 10.3390/rs12193215
- Verba V.S., Neronski L.B., Osipov I.G., Turuk V.E., *Radiolokatsionnye sistemi zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Satellite radar systems for remote sensing), Moscow: Radiotekhnika, 2010, 675 p. [In Russian].

About the authors

BABAYANTZ Igor Pavlovich – leading engineer, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(903) 788-18-97. E-mail: pa81@yandex.ru.

BARYAKH Alexander Abramovich – Dr. Sci. (Eng.), Academician, RAS, Director of Perm Federal Research Center of UB RAS, Head of Laboratory, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Lenina street, 13a, Perm, 614990, Russia. Ph.: +7(342) 219-84-38. E-mail: bar@mi-perm.ru

VOLKOVA Maria Sergeevna – researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-85-77. E-mail: msvolkova6177@gmail.com

MIKHAILOV Valentin Olegovich – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Corresponding Member RAS, Head of Laboratory, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-85-77. E-mail: mikh@ifz.ru

TIMOSHKINA Elena Pavlovna – Cand.Sci. (Phys.-Math.), senior researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-85-77. E-mail: elena@timoshkin.ru

KHAIRETDINOV Stanislav Akhmedovich – researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-85-77. E-mail: khairtdinov-st@mail.ru