Возможности мониторинга оседаний на территории Кузбасса средствами радарной спутниковой интерферометрии

Е. П. Тимошкина, И. П. Бабаянц, В. О. Михайлов, С. А. Хайретдинов

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия
E-mail: mikh@ifz.ru

Приведены результаты пилотного проекта по оценке смещений земной поверхности в районе г. Ленинска-Кузнецкого, полученные по снимкам нового спутника Sentinel-1C за осень 2025 г. В целом области смещений фиксируются на всей территории исследований. Выявлено более 40 областей, в которых оседания превосходят 5 см за 72 дня. За относительно короткий период мониторинга оседания в некоторых мульдах сдвижения осенью 2025 г. достигали 30 см за 72 дня. Зарегистрированные на интервале в 72 дня смещения относительно невелики, но для оценки опасности таких оседаний необходим регулярный мониторинг, чтобы определить динамику дальнейшего развития процесса. Приведённые в работе результаты демонстрируют эффективность применения методов спутниковой радарной интерферометрии для выявления областей оседания земной поверхности на территории Кузнецкого угольного бассейна. Начало съёмки обширных территорий спутником Sentinel-1C открывает возможности для проведения регулярного мониторинга в бесснежный период, который в Кузбассе в среднем длится с конца апреля по начало ноября. Мониторинг за более длительный период позволит прослеживать перемещение по поверхности мульд сдвижения и вовремя фиксировать их приближение к значимым инфраструктурным объектам, таким как дороги, посёлки, промышленные предприятия, жилые дома, а также следить за изменениями скорости смещений и своевременно выявлять участки возможного обрушения. Данные о смещениях земной поверхности также используются для калибровки численных моделей напряжённо-деформированного состояния подработанных массивов горных пород, что позволяет давать прогноз эволюции напряжённо-деформированного состояния на основе планов проведения дальнейших горных работ.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, оседания земной поверхности, Кузбасс, радарная съёмка, спутник Sentinel-1C

Одобрена к печати: 16.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-182-191

Введение

Одно из наиболее крупных угольных месторождений мира — Кузнецкий угольный бассейн (Кузбасс) — является самым развитым по объёму добычи в России. Это связано с высоким качеством угля, который используется для металлургии и энергетики. По данным на 27.02.2025 (https://mupk42.ru/ru/industry/), балансовые запасы каменных углей оцениваются в 67,9 млрд т, а бурых углей — в 52,7 млрд т, работает 151 угледобывающее и перерабатывающее предприятие, включая 39 шахт, 55 разрезов. В то же время Кузбасс — одно из самых старых промышленных угольных месторождений в нашей стране. Добыча здесь ведётся в разрезах и шахтах, при этом подземные выработки считаются наиболее трудоёмкими и опасными. Большие площади подработанных территорий создают дополнительные риски, которые связаны с оседанием поверхности как над действующими вырабатываемыми лавами, так и над старыми и заброшенными шахтами, информация о которых частично утеряна (Эпов и др., 2012). Этим определяется актуальность проведения регулярного мониторинга оседаний на больших территориях Кузбасса.

Регулярный мониторинг смещений земной поверхности на подработанных территориях проводится в основном наземными геодезическими методами вдоль профилей и GPS-приёмниками (*англ.* Global Positioning System) на постоянных или временных пунктах глобальных навигационных спутниковых систем (Миков, Потапов, 2024). Такой мониторинг является весьма трудоёмким, в первую очередь из-за необходимости вести повторные

измерения на обширных территориях, часть из которых труднодоступна (лесные массивы, карьеры, отвалы и т. д.). Методы спутниковой радарной интерферометрии, позволяющие регулярно определять смещения земной поверхности на больших территориях с сантиметровой точностью, представляют собой современный развитый инструмент для мониторинга смещений земной поверхности, включая разрабатываемые месторождения. Смещения земной поверхности по спутниковым данным используются совместно с данными наземных наблюдений и существенно их дополняют. В большинстве развитых стран спутниковые технологии применяются для мониторинга различных месторождений (угольных, калийных, нефтегазовых), а также опасных природных процессов (землетрясения, вулканические и оползневые процессы), угрожающих городской или промышленной инфраструктуре. Сотрудники Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта (ИФЗ РАН) более 20 лет работают в области применения спутниковой радарной интерферометрии для исследования перечисленных объектов. Описание методов, некоторые результаты и библиографию можно найти в работах (Бабаянц и др., 2023; Барях и др., 2023, 2025; Волкова и др., 2023, 2026; Михайлов и др., 2010, 2014; Смольянинова и др., 2022; Volkova et al., 2022).

Оценки оседаний по спутниковым радиолокационным снимкам для отдельных районов Кузбасса были ранее описаны в ряде работ, например, (Гиниятуллина, Миков, 2015; Миков, Потапов, 2024; Шокин и др., 2016; Эпов и др., 2012). Использовались снимки различных диапазонов длин волн: короткого X-диапазона (снимки спутников CosmoSky-Med, TerraSAR-X); среднего C-диапазона (спутник Sentinel-1B) и длинного L-диапазона (спутник ALOS-2 (*англ.* Advanced Land Observing Satellite)). Однако начиная с 2022 г. коммерческие снимки спутников CosmoSky-Med, TerraSAR-X и ALOS-2 стали недоступны для российских исследователей, а спутник Европейского космического агентства (*англ.* European Space Agency) Sentinel-1B, снимавший территорию от восточного берега Волги до Дальнего Востока, вышел из строя из-за проблем с электропитанием антенны в декабре 2021 г. Это остановило работы по мониторингу Кузбасса, как и практически всех регионов Сибири. Новый спутник Sentinel-1C был запущен 5 декабря 2024 г., его снимки стали поступать с середины 2025 г., что позволяет начать регулярный мониторинг оседаний на территории Кузнецкого бассейна. Настоящая статья посвящена результатам пилотного проекта по оценке смещений земной поверхности в районе г. Ленинска-Кузнецкого, полученным по снимкам нового спутника Sentinel-1C за осень 2025 г.

Определение смещений по спутниковым радарным снимкам

Технология определения смещений земной поверхности с применением радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) (*англ.* Synthetic Aperture Radar — SAR) основана на анализе амплитуды и фазы радиолокационного сигнала, излучённого антенной спутника и отражённого от одного и того же участка земной поверхности (пикселя). Фаза отражённого сигнала несёт информацию о расстоянии от спутника до отражающего объекта. Разность фаз сигналов, полученных от одной и той же отражающей площадки, после введения соответствующих поправок позволяет оценить смещения этой площадки за время между повторными съёмками, которое для спутников Sentinel-1 составляет 12 дней. Теоретическим основам РСА-интерферометрии посвящён ряд зарубежных работ, например, (Ferretti, 2014; Hanssen, 2001; Massonnet, Souyris, 2008; Rosen et al., 2000). На русском языке информацию можно найти в монографии (Верба и др., 2010) и перечисленных выше статьях.

Важно отметить, что спутниковые радары посылают электромагнитные сигналы под углом к вертикали, который для спутника Sentinel-1 меняется в пределах снимка от 30 до 50° и направлен вправо от направления полёта. Поэтому разность фаз отражённых сигналов позволяет определить смещения в направлении на спутник LOS (*англ.* line-of-sight). Эти смещения связаны со смещениями отражающей площадки на север, восток и по вертикали U_N, U_E и U_Z (Hanssen, 2001) следующим образом:

$$U_{\mathrm{LOS}} = U_Z \cos\theta + \sin\theta(U_N \sin\beta - U_E \cos\beta). \quad (1)$$

Здесь U_{LOS} — смещения в направлении на спутник (положительные при смещении к спутнику); θ — угол отклонения от вертикали направления распространения радарного сигнала; β — азимут орбиты. Смещения U_Z положительны при движении вверх.

Спутник снимает одну и ту же территорию с так называемой восходящей орбиты, когда он движется относительно наблюдателя с юга на север и посылает излучение на восток, и с нисходящей орбиты, когда он движется с севера на юг и посылает сигнал на запад. На исследуемую область доступны снимки только с нисходящей орбиты, типичные значения азимута которой β = 190°, средний угол наклона зондирующего луча в плоскости, перпендикулярной к орбите, θ = 40°. Тогда для нисходящей орбиты *des* (*англ*. descending) имеем:

$$U_{\text{LOS}}^{des} = 0{,}766U_Z - 0{,}112U_N + 0{,}633U_E. \quad (2)$$

При оценке смещений земной поверхности на территориях, где ведётся подземная добыча полезных ископаемых, основной интерес представляет оценка вертикальной компоненты вектора смещения. Если горизонтальные смещения невелики, то вертикальные смещения можно определить, разделив U_{LOS}^{des} на косинус угла наклона зондирующего луча θ. Такие смещения принято называть субвертикальными (Бабаянц и др., 2023; Барях и др., 2023).

При карьерном способе добычи полезных ископаемых, а также при более тонком анализе локальных смещений над отдельными лавами или в задачах, связанных с оползневыми процессами, проводится также оценка горизонтальных смещений. Для этого нужны снимки с нисходящей и восходящей орбиты, которые дают два уравнения вида (1), но с различными коэффициентами. В этом случае северной компонентой смещений, которая входит в уравнение (2) с малым коэффициентом, пренебрегают. В настоящей статье мы будем говорить о субвертикальных смещениях, а именно об оценке оседаний земной поверхности.

Область исследований и поля оседаний

Для демонстрации возможностей нового спутника Sentinel-1C для выполнения мониторинга оседаний на подработанных территориях Кузбасса нами была выбрана область, охватывающая центральную часть бассейна в пределах 54,40–54,80° с. ш. и 85,85–86,55° в. д., которая включает ряд месторождений: Ленинское, Егозово-Красноярское, Никитинское и др.* (*рис. 1*).

Были проведены расчёты суммарных оседаний на территории центральной части Кузбасского угольного бассейна за осенний период 2025 г. Для этого использовано 7 радарных снимков спутника Sentinel-1C, полученных с нисходящей 165-й относительной орбиты, за период с 26 августа по 6 ноября 2025 г. Интервал между снимками спутников Sentinel-1 составляет 12 дней, поэтому общий интервал времени, за который были оценены смещения, равен 72 дням. Для каждой последующей пары снимков рассчитаны поля смещений за период 12 дней. Далее эти поля последовательно суммировались с вычитанием длинноволнового набега фазы, который может возникать вследствие особенностей рельефа, атмосферных помех или больших некогерентных участков на отдельных парных интерферограммах. Методом суммирования можно проводить мониторинг последовательно и непрерывно, пока позволяют погодные условия. Например, при установлении постоянного снежного покрова мониторинг прекращается из-за неудовлетворительной когерентности парных интерферограмм, но возобновляется после таяния снежного покрова. Отметим, что методы устойчивых отражателей, основанные на одновременном анализе серии снимков, в данном случае нами не применялись по причине относительно короткой серии РСА-снимков.

В результате расчётов на исследуемой территории были выявлены области оседаний, которые связаны с подземными выработками, угольными разрезами и возможными оседаниями над старыми шахтами и карьерами. На *рис. 2* дана карта оседаний за 72 дня осеннего периода 2025 г., с 26 августа по 6 ноября. Для более удобного просмотра показаны только те пиксели, где оседания за 72 дня превзошли 2 см.

* По данным сайта https://www.nedraexpert.ru/subsurface/1144751299/1.

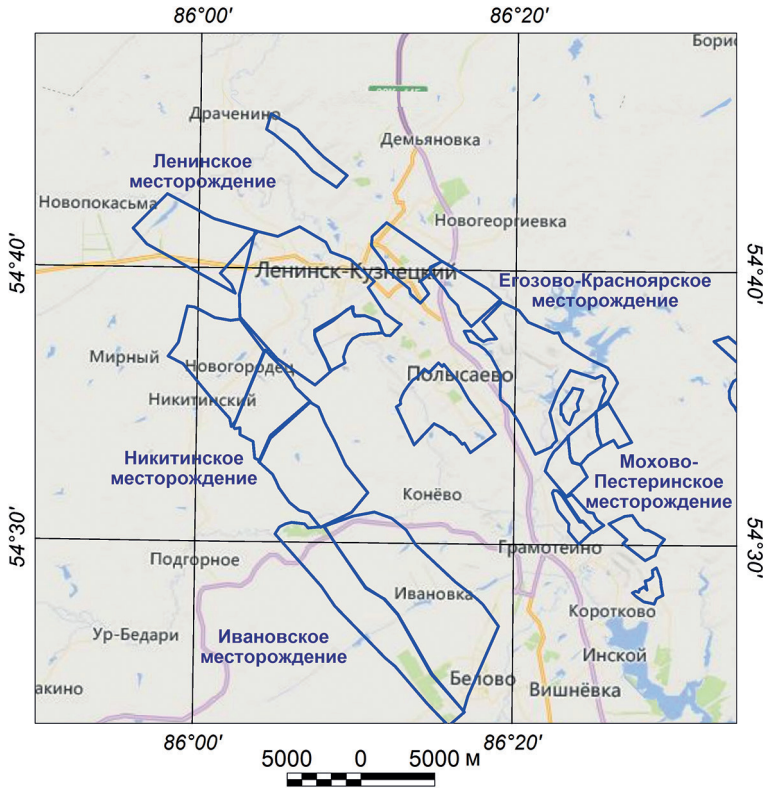

Рис. 1. Фрагмент РСА-снимка, для которого проведены расчёты, и основные угольные месторождения в области исследований

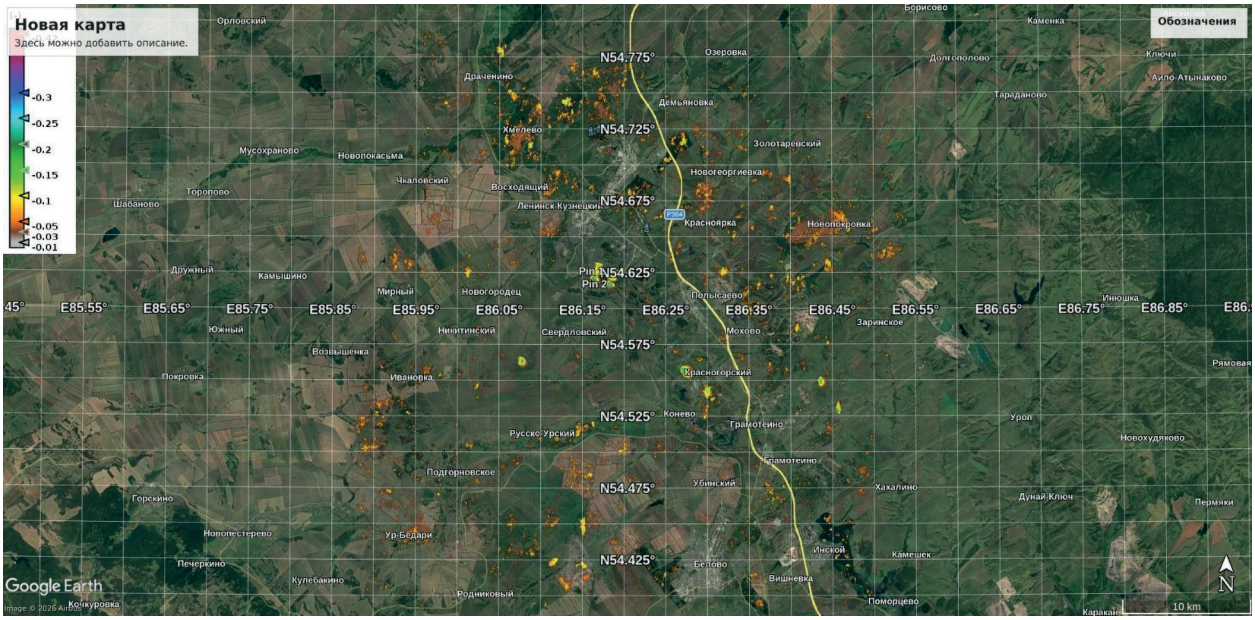

Рис. 2. Карта суммарных оседаний за осенний период с 26 августа по 6 ноября 2025 г. Цветовая шкала в метрах. Показаны только те пиксели, где оседания превосходят 2 см. Метками Pin 1 и Pin 2 обозначены мульды сдвижения, показанные на *рис. 3*

На карте (см. *рис. 2*) видно, что оседания прослеживаются на обширной территории. Они хорошо видны как на открытых угольных разрезах, так и над действующими подземными выработками. Также они могут фиксироваться над старыми подработанными шахтами и выработанными угольными разрезами. В целом на всей исследуемой территории наблюдаются

порядка сорока с лишним подобных областей (количество таких областей зависит от того, что следует считать отдельной областью оседаний), в которых максимальная величина оседаний за 72 дня колеблется от 5 до 30 см.

Для примера, на *рис. 3* дан увеличенный фрагмент этой же карты, в южной части г. Ленинска-Кузнецкого, где наблюдаются наибольшие оседания за указанный период над двумя действующими подземными выработками. Мульды сдвижения помечены на *рис. 2* и *3* метками Pin 1 и Pin 2.

На *рис. 4* и *5* даны графики смещений вдоль профилей, проведённых через эти мульды сдвижения в направлении с северо-востока на юго-запад. Максимальная величина оседаний за 72 дня в данных мульдах составляет 30 и 25 см соответственно.

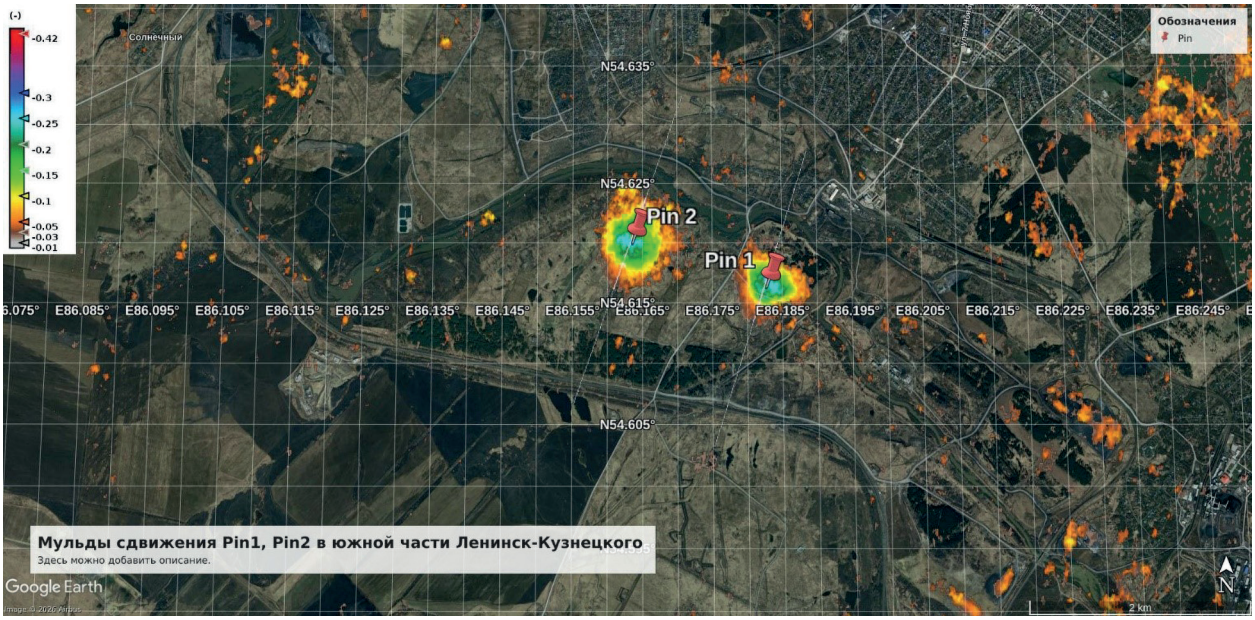

Рис. 3. Две мульды сдвижения над действующими выработками в южной части г. Ленинска-Кузнецкого, оседания в которых за 72 дня (с 26.08 по 06.11.2025) превосходят 25 см. Мульды помечены метками Pin 1 и Pin 2. Цветовая шкала в метрах

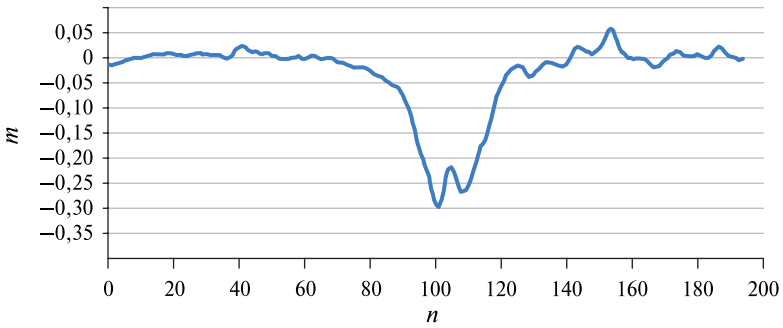

Рис. 4. График смещений вдоль профиля северо-восток – юго-запад через область оседаний в районе метки Pin 1. Вертикальная шкала на графике в метрах, горизонтальная — количество пикселей вдоль профиля

Мульды сдвижения хорошо прослеживаются на всех угольных разрезах. На *рис. 6* приведён пример области оседаний на угольном разрезе южнее пос. Полысаево. На *рис. 7* показан график смещений вдоль профиля, проведённого через данную область в направлении с северо-запада на юго-восток и помеченного меткой Pin 3. Величина максимального оседания за 72 дня на данном разрезе составляет 28 см.

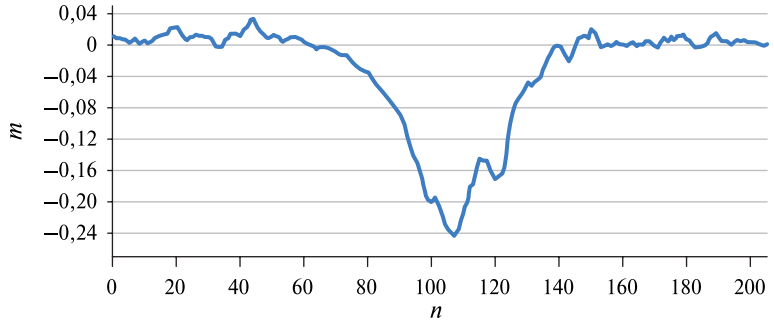

Рис. 5. График смещений вдоль профиля северо-восток – юго-запад через область оседаний в районе метки Pin 2. Обозначения те же, что и на *рис. 4*

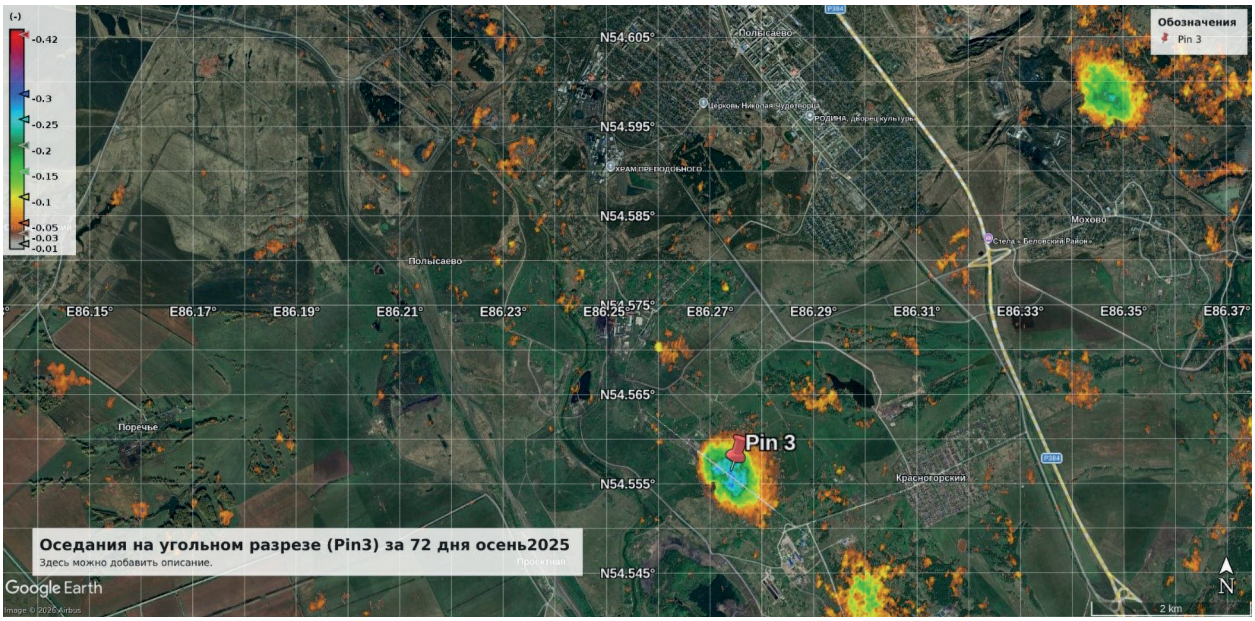

Рис. 6. Область оседаний с величиной более 2 см за 72 дня на угольном разрезе южнее пос. Полысаево. Для мульды сдвижения, помеченной меткой Pin 3, на *рис. 7* приведён график смещений. Цветовая шкала в метрах

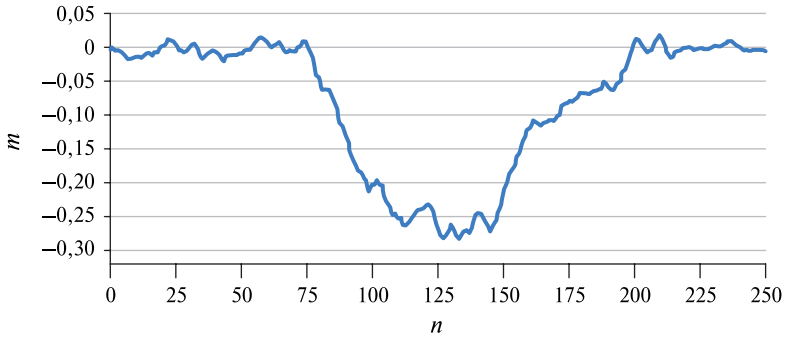

Рис. 7. График смещений вдоль профиля северо-запад – юго-восток через область оседаний на угольном разрезе в районе метки Pin 3. Обозначения те же, что и на *рис. 4*

Обсуждение и выводы

Приведённые в работе результаты демонстрируют эффективность применения методов спутниковой радарной интерферометрии для выявления областей оседания земной поверхности на территории Кузнецкого угольного бассейна. Начало съёмки обширных территорий спутником

Sentinel-1C открывает возможности для проведения регулярного мониторинга в бесснежный период, который в Кузбассе в среднем длится с апреля до ноября. За относительно короткий период мониторинга продолжительностью в 72 дня оседания в некоторых мульдах сдвижения осенью 2025 г. достигали 30 см. Зарегистрированные на интервале смещения относительно невелики, но для оценки опасности таких оседаний необходим регулярный мониторинг, чтобы определить динамику дальнейшего развития процесса. Действительно, если мульда будет перемещаться, то суммарное оседание будет расти медленно, формируя вытянутую область вслед за движением лавы. Если же оседания связаны с формированием провала, т. е. мульда не движется, то средняя скорость оседания может превысить 150 см/год, что представляет большую опасность для гражданской и промышленной инфраструктуры.

В целом области смещений фиксируются на всей территории исследований. Выявлено более 40 областей с оседаниями от 5 до 30 см за 72 дня. Для определения природы оседаний необходимо привлекать наземные данные, поскольку смещения происходят на открытых угольных разрезах, над действующими и закрытыми подземными выработками, а также могут быть связаны с хозяйственной деятельностью на поверхности и с природными процессами.

Практика показывает, что оседания на угольных и других разрезах прослеживаются стабильно, поскольку при открытом способе добычи исследуемая поверхность хорошо просматривается со спутника. Оседания над подземными выработками, в зависимости от сезона, могут частично маскироваться растительностью в лесных массивах, болотами или полями, на которых ведётся активная сельскохозяйственная деятельность. Поэтому каждый исследуемый объект требует внимательной оценки поверхностных факторов, с тем чтобы в случае необходимости корректировать полученные результаты смещений.

Если осуществлять мониторинг за более длительный период, то над действующими выработками можно прослеживать перемещение мульд сдвижения по поверхности и вовремя фиксировать их приближение к значимым инфраструктурным объектам, таким как дороги, посёлки, промышленные предприятия, жилые дома. Мониторинг угольных разрезов применяется для оценки величины и характера смещений на отдельных участках разреза с тем, чтобы следить за изменениями скорости смещений и своевременно выявлять участки возможного обрушения. Также спутниковые технологии позволяют оценивать сезонные изменения в величинах смещений, что особенно важно для периодов весеннего половодья, когда может происходить затопление старых, а порой и действующих шахт, которое сопровождается насыщением водой угольных пластов. Изучение сезонных особенностей, присущих конкретным регионам, даёт возможность прогнозировать вероятные негативные последствия для тех или иных объектов и принимать соответствующие меры по обеспечению безопасности.

Данные о смещениях земной поверхности также используются для калибровки численных моделей напряжённо-деформированного состояния подработанных массивов горных пород, что позволяет делать прогноз на основе планов проведения дальнейших горных работ (Бабаянц и др., 2023; Барях и др., 2023, 2025).

Работа выполнена в рамках госзадания Института физики Земли РАН.

Литература

1. *Бабаянц И. П.*, *Михайлов В. О.*, *Тимошкина Е. П.*, *Барях А. А.* Соотношение глубины и геометрии мульды сдвижения, определяемых по спутниковым радарным снимкам с одной или двух орбит // Геофиз. исслед. 2023. Т. 24. № 4. С. 28–42. DOI: 10.21455/gr2023.4-2.
2. *Барях А. А.*, *Девятков С. Ю.*, *Денкевич Э. Т. и др.* Геомеханическое сопровождение спутникового радарного мониторинга оседаний подработанных территорий // Горный журн. 2023. № 8(2313). С. 40–49. DOI: 10.17580/gzh.2023.08.06.
3. *Барях А. А.*, *Самоделкина Н. А.*, *Бабаянц И. П. и др.* Оценка состояния подработанного массива на основе данных радарной интерферометрии и результатов численного моделирования // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2025. Вып. 5. С. 3–14. DOI: 10.15372/FTPRPI20250501.

4. *Верба В. С.*, *Неронский Л. Б.*, *Осипов И. Г.*, *Турук В. Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
5. *Волкова М. С.*, *Михайлов В. О.*, *Османов Р. С.* Интерпретация полей смещений на склонах вулкана Шивелуч (Камчатка), полученных по спутниковым радарным снимкам с двух орбит // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 109–119. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-109-119.
6. *Волкова М. С.*, *Михайлов В. О.*, *Османов Р. С.* О некоторых методических вопросах мониторинга вулканических районов Камчатки по данным спутниковой радиолокационной интерферометрии на примере Авачинско-Корякской группы // Геофиз. исслед. 2026. Т. 27. № 1. С. 5–22. DOI: 10.21455/gr2026.1-1.
7. *Гиниятуллина О. Л.*, *Миков Л. С.* Использование технологии SBaS для обработки многопроходной серии радарных изображений // Журн. СФУ. Техника и технологии. 2015. № 6. С. 755–762. DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-6-755-762.
8. *Миков Л. С.*, *Потапов В. П.* Применение радарной интерферометрии для комплексной оценки геомеханических и термодинамических процессов (на примере Кузбасса) // Вестн. Науч. центра ВостНИИ по пром. и эколог. безопасности. 2024. № 3. С. 34–43. DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.87.44.004.
9. *Михайлов В. О.*, *Назарян А. Н.*, *Смирнов В. Б.*, *Диаман М.*, *Шапиро Н. М.*, *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 г. // Физика Земли. 2010. № 2. С. 3–16.
10. *Михайлов В. О.*, *Киселева Е. А.*, *Смольянинова Е. И. и др.* 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. DOI: 10.7868/S0002333714040103.
11. *Смольянинова Е. И.*, *Михайлов В. О.*, *Дмитриев П. Н.* Интерактивная карта активных оползневых участков и зон проседания грунтов для Центрального и Адлерского районов Большого Сочи по данным спутниковой радарной интерферометрии за 2015–2021 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 141–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-141-149.
12. *Шокин Ю. И.*, *Потапов В. П.*, *Попов С. Е.*, *Гиниятуллина О. Л.* Спутниковая радарная интерферометрия: информационно-вычислительные аспекты // Вычисл. технологии. 2016. Т. 21. № 1. С. 141–151.
13. *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 // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 4. С. 26–29.
14. *Ferretti A.* Satellite InSAR data: Reservoir monitoring from space. EAGE, 2014. 178 p.
15. *Hanssen R. N.*, Radar interferometry — data interpretation and error analysis. Kluwer Academic Publishers, 2001. 308 p.
16. *Massonnet D.*, *Souyris J.-C.* Imaging with synthetic aperture radar. EFPL Press, 2008. 280 p.
17. *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. 2000. V. 88. Iss. 3. P. 333–382.
18. *Volkova M. S.*, *Shapiro N. M.*, *Melnik O. E. et al.* Subsidence of the lava flows emitted during the 2012–2013 eruption of Tolbachik (Kamchatka, Russia): Satellite data and thermal model // J. Volcanology and Geothermal Research. 2022. V. 427. Article 107554. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2022.107554.

On potential for subsidence monitoring in Kuzbass territory using SAR interferometry

E. P. Timoshkina, I. P. Babayants, V. O. Mikhailov, S. A. Khairetdinov

Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow 123242, Russia
E-mail: mikh@ifz.ru

We present the results of a pilot project to assess ground displacements in the Leninsk-Kuznetsky area obtained from SAR images from the new Sentinel-1C satellite in the fall of 2025. Overall, displacement areas were detected throughout the whole study region. More than 40 areas were identified where subsidence exceeded 5 cm over 72 days. During a relatively short subsidence monitoring period, displacements in some troughs in the fall of 2025 reached 30 cm over 72 days. The displacements recorded over a 72-day interval were relatively small, but regular monitoring is necessary to assess the danger of such subsidence and the dynamics of its further development. The results presented in this paper demonstrate the effectiveness of SAR interferometry methods for identifying areas of ground subsidence in the Kuznetsk coal basin. The commencement of Sentinel-1C satellite surveys over vast areas opens up opportunities for regular monitoring during the snow-free period that usually lasts from late April to early November in Kuzbass. Longer-term monitoring will enable tracking the movement of ground motion troughs and promptly detecting their approach to significant infrastructure assets, such as roads, villages, industrial facilities, and residential buildings, as well as monitor acceleration of displacement speed and promptly identify areas of potential collapse. Ground displacement data are also used to calibrate numerical models of the stress-strain state of underworked rock masses, enabling forecasting stress-strain state evolution depending on future mining plans.

Keywords: satellite monitoring, ground subsidence, Kuzbass, SAR imaging, Sentinel-1C

Accepted: 16.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-182-191

References

1. Babayants I. P., Mikhailov V. O., Timoshkina E. P., Baryakh A. A., Relation of the depth and geometry of the displacement trough, determined by satellite radar images from one or two orbits, *Geophysical Research*, 2023, V. 24, No. 4, pp. 28–42 (in Russian), DOI: 10.21455/gr2023.4-2.
2. Baryakh A. A., Devyatkov S. Yu., Denkevich E. T. et al., Geomechanical supervision of undermined area subsidence monitoring with satellite radars, *Gornyi zhurnal*, 2023, No. 8(2313), pp. 40–49 (in Russian), DOI: 10.17580/gzh.2023.08.06.
3. Baryakh A. A., Samodelkina N. A., Babayants I. P. et al., Rock mass condition assessment using InSAR and numerical modeling, *J. Mining Science*, 2025, V. 61, pp. 689–698, DOI: 10.1134/S1062739125050011.
4. Verba V. S., Neronsky L. B., Osipov V. S., Turuk V. E., *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-based radar systems for land survey), Moscow: Radiotekhnika, 2010, 680 p. (in Russian).
5. Volkova M. S., Mikhailov V. O., Osmanov R. S., Interpretation of displacement fields on the slopes of Shiveluch volcano (Kamchatka) obtained from SAR interferometry images from two orbits, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 109–119 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-109-119.
6. Volkova M. S., Mikhailov V. O., Osmanov R. S., On some methodological issues of monitoring volcanic regions of Kamchatka based on radar interferometry data: Example of Avachinsky-Koryaksky group, *Geophysical Research*, 2026, V. 27, No. 1, pp. 5–22 (in Russian), DOI: 10.21455/gr2026.1-1.
7. Giniyatullina O. L., Mikov L. S., Using SBaS technology for multi-pass series of radar images processing, *J. Siberian Federal University. Engineering and Technology*, 2015, No. 6, pp. 755–762 (in Russian), DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-6-755-762.
8. Mikov L. S., Potapov V. P., Application of radar interferometry for a comprehensive assessment of geomechanical and thermodynamic processes (using the example of Kuzbass), *Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoi i ehkologicheskoi bezopasnosti*, 2024, No. 3, pp. 34–43 (in Russian), DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.87.44.004.

9. Mikhailov V. O., Nazaryan A. N., Smirnov V. B. et al., 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, V. 46, pp. 91–103. DOI: 10.1134/S1069351310020011.
10. Mikhailov V. O., Kiseleva E. A., Smol'yaninova E. I. et al., 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, V. 50, No. 4, pp. 576–587, DOI: 10.1134/S1069351314040107.
11. Smol'yaninova E. I., Mikhailov V. O., Dmitriev P. N., Interactive map of active landslides and subsiding areas for the Central and Adler regions of the Big Sochi based on InSAR data for the period 2015–2021, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 4, pp. 141–149 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-141-149.
12. Shokin Y. I., Potapov V. P., Popov S. E., Giniyatullina O. L., Satellite radar interferometry: information computer aspects, *Computational Technologies*, 2016, V. 21, No. 1, pp. 141–151 (in Russian).
13. Epov M. I., Mironov V. L., Chymitdorzhiev T. N. et al., Observation of Earth's surface subsidence in the area of Kuzbas underground coal mining with ALOS PALSAR radar interferometry, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, Iss. 4, pp. 26–29 (in Russian).
14. Ferretti A., *Satellite InSAR data: Reservoir monitoring from space*, EAGE, 2014, 178 p.
15. Hanssen R. N., *Radar interferometry — data interpretation and error analysis*, Kluwer Academic Publishers, 2001, 308 p.
16. Massonnet D., Souyris J.-C., *Imaging with synthetic aperture radar*, EFPL Press, 2008, 280 p.
17. Rosen P. A., Hensley S., Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodrıguez E., Goldstein R. M., Synthetic aperture radar interferometry, *Proc. IEEE*, 2000, V. 88, No. 3, pp. 333–382.
18. Volkova M. S., Shapiro N. M., Melnik O. E. et al., Subsidence of the lava flows emitted during the 2012–2013 eruption of Tolbachik (Kamchatka, Russia): Satellite data and thermal model, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 2022, V. 427, Article 107554, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2022.107554.