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, г. Москва

Аннотация

В презентации представлены результаты пилотного проекта по оценке смещений земной поверхности в районе г. Ленинск-Кузнецкий, 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 35 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.

Результаты исследования демонстрируют эффективность применения методов спутниковой радарной интерферометрии для выявления областей оседания земной поверхности на территории Кузнецкого угольного бассейна и для проведения регулярного мониторинга в бесснежный период, который в Кузбассе в среднем длится с конца апреля по начало ноября.

Мониторинг за более длительный период времени позволит прослеживать перемещение по поверхности мульд сдвижения и вовремя фиксировать их приближение к значимым инфраструктурным объектам, таким как дороги, поселки, 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 напряженно-деформированного состояния (НДС) подработанных массивов горных пород, что позволяет давать прогноз эволюции НДС на основе планов проведения дальнейших горных работ (например, Барях и др., 2023).

Обоснование постановки исследований

Кузбасс является одним из самых старых промышленных угольных месторождений в нашей стране. Добыча здесь ведётся в разрезах и шахтах. 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).

Регулярный мониторинг смещений земной поверхности на подработанных территориях Кузнецкого угольного бассейна проводится, в основном, наземными геодезическими методами вдоль профилей и GNSS-приемниками (GPS, GLONASS) (Миков, Потапов, 2024). Такой мониторинг является весьма трудоемким и не позволяет регулярно и детально исследовать обширные территории из-за высоких операционных затрат.

Метод спутниковой радарной интерферометрии позволяет регулярно (каждые 12 дней) определять смещение земной поверхности на огромных территориях (до 250х250 км) с сантиметровой точностью на миллионах площадок, что позволяет отслеживать развитие опасных процессов во времени. Смещения земной поверхности по спутниковым данным используются совместно с данными наземных наблюдений и существенно их дополняют.

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., 2014).

Оценки оседаний по спутниковым радиолокационным (РЛ) снимкам для отдельных районов Кузбасса были ранее выполнены 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).

Задачи спутниковой радарной интерферометрией в Кузбассе

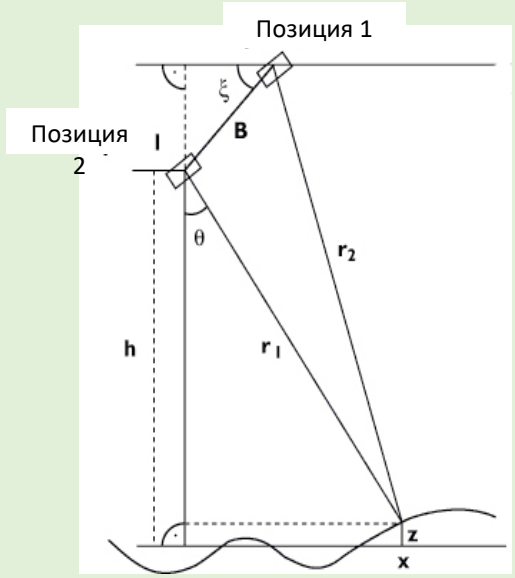
Регулярный мониторинг оседаний позволит:

- **выявлять области новых смещений** земной поверхности, на ранней стадии их развития;
- **вести мониторинг оседаний на территории закрытых шахт**, особенно там, где не проводятся необходимые регламентные работы;
- **выявлять опасные оседания над горными выработками**, оценивать напряженно-деформированное состояние горных массивов методами численного моделирования с параметризацией численных моделей по данным спутникового мониторинга, выполнять численный прогноз развития опасных процессов.

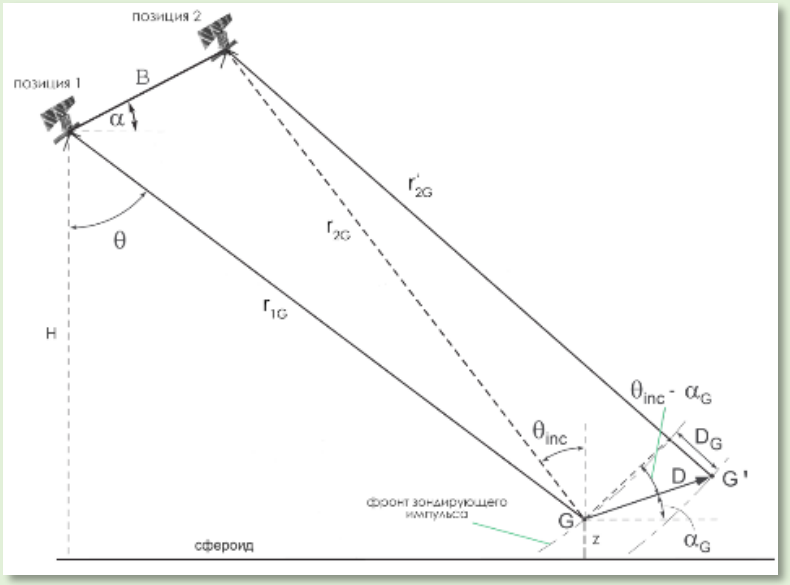


Основы РСА-интерферометрии

Технология определения смещений земной поверхности с применением радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА, в английской литературе – SAR), основана на анализе амплитуды и фазы РЛ-сигнала, излученного антенной спутника и отраженного от одного и того же участка земной поверхности (пикселя). Фаза отраженного сигнала несет 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 съемками, которое для спутников Sentinel-1 составляет 12 дней. Теоретическим основам РСА-интерферометрии посвящен ряд зарубежных монографий, 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.



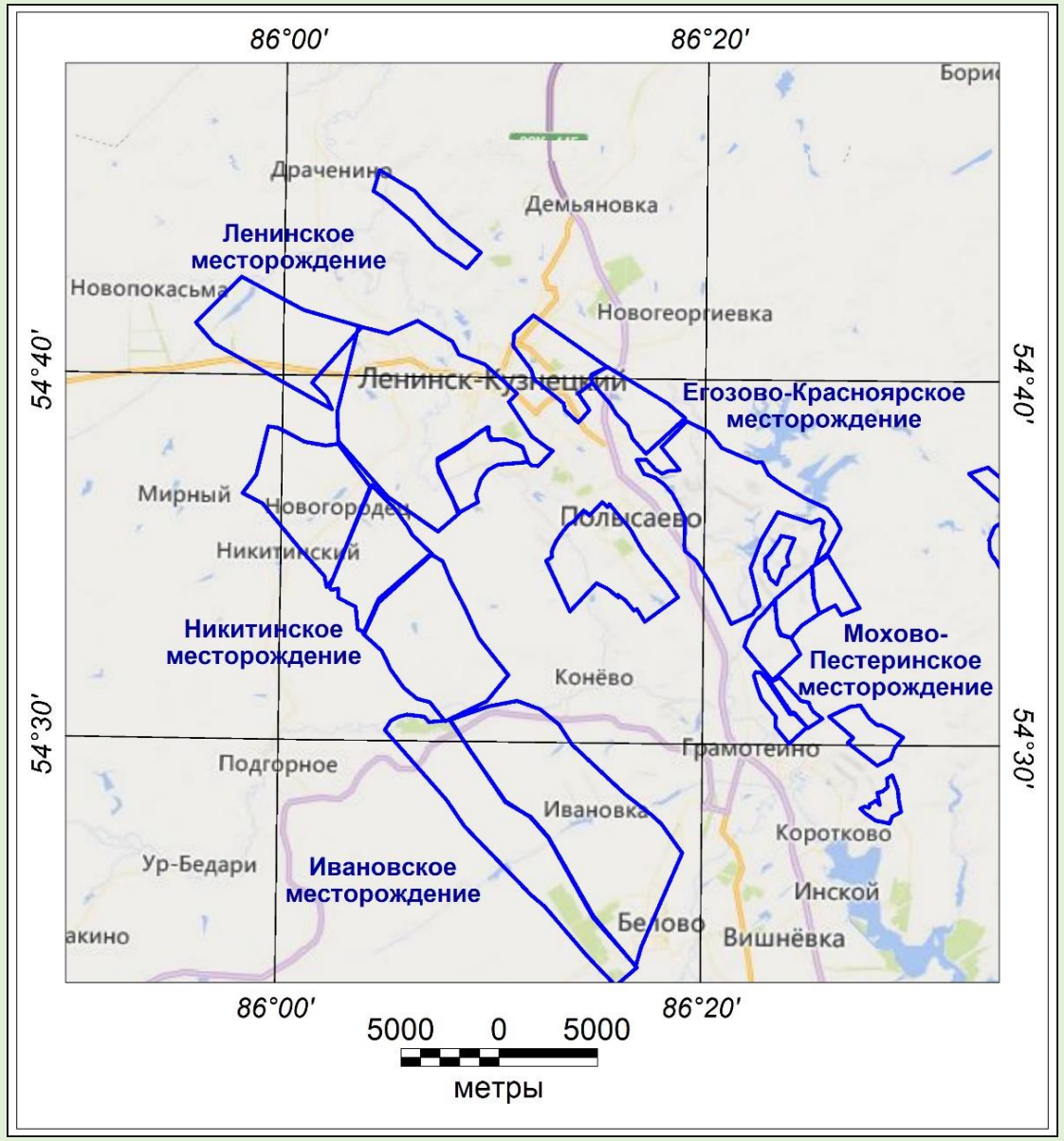
Для выполнения интерферометрической обработки необходимо наличие как минимум двух снимков одного и того же участка земной поверхности



Если за время между съемками отражающая поверхность сместилась (Ḋ), то изменится и наклонная дальность (r). Наличие базы интерферометра (B) приводит к необходимости учета топографии

Ограничения метода: временная декорреляция снимков из-за изменений ландшафта, растительности, снежного покрова и др. (невозможно использовать снимки с большим временным интервалом)

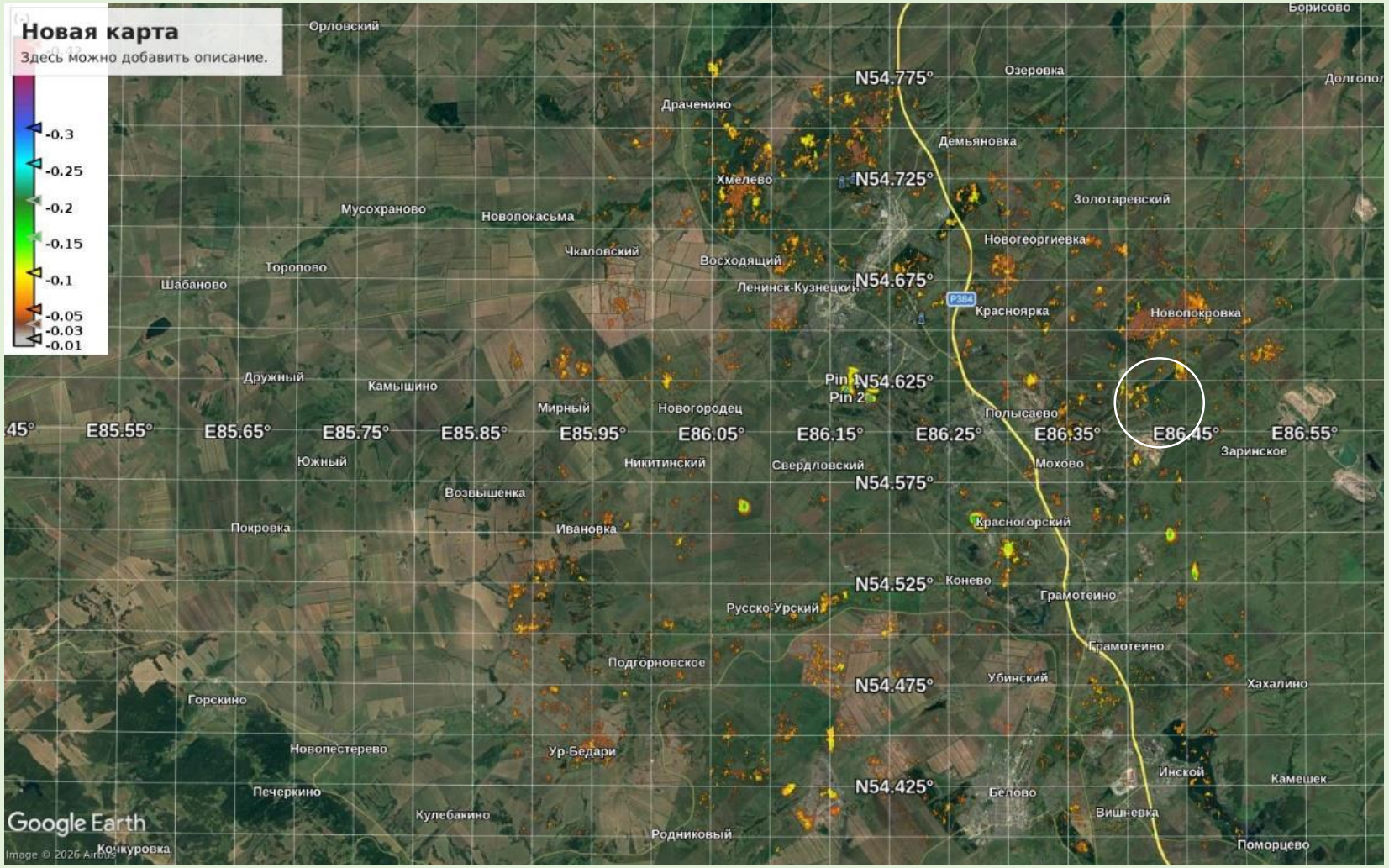
Оседания в районе г. Ленинск-Кузнецкий за 72 дня 2025 г.



Выполнен мониторинг оседаний на подработанных территориях Кузбасса для области, охватывающей 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.

На рисунке показаны контуры части снимка, для которой проведены расчеты и основные угольные месторождения в области исследований.

Оседания над угольными шахтами в Кузнецком бассейне по семи снимкам спутника Sentinel-1C с 26 августа по 6 ноября 2025 г.

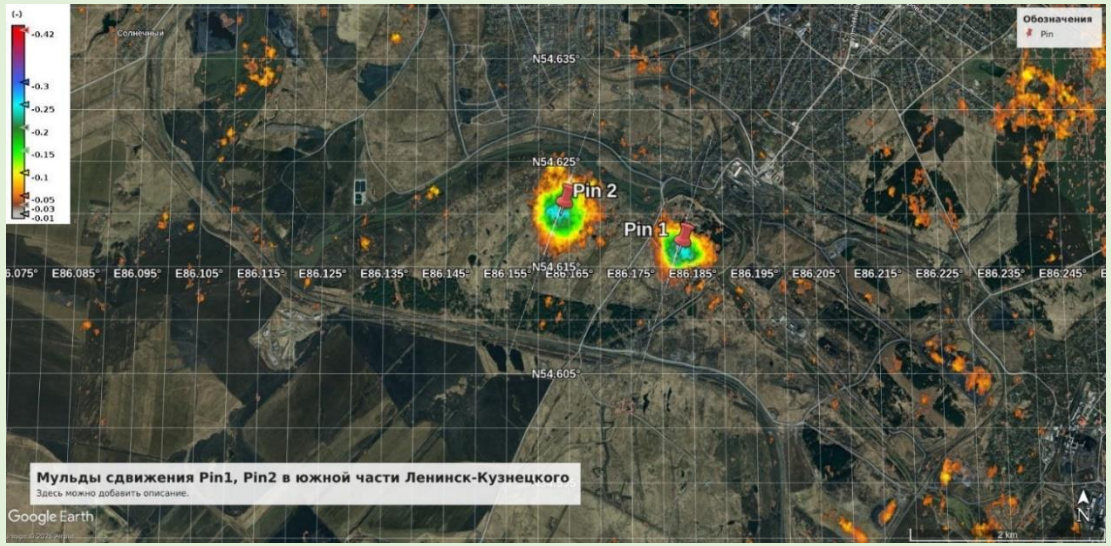


Оседания над горными выработками за 72 дня в долях метра. на карте GoogleEarth. Показаны только те пиксели, где оседания превосходят 2 см. В круге две мульды сдвижения южнее г. Ленинск-Кузнецкий, показанные на следующем слайде.

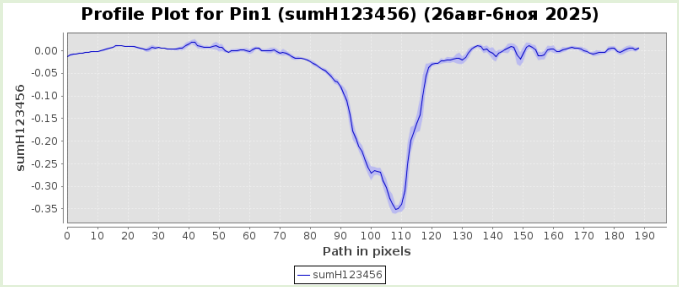
Карта показывает, что оседания прослеживаются на обширной территории. Они хорошо видны как на открытых угольных разрезах, так и над действующими подземными выработками. Также они могут фиксироваться над старыми подработанными шахтами и выработанными угольными разрезами.

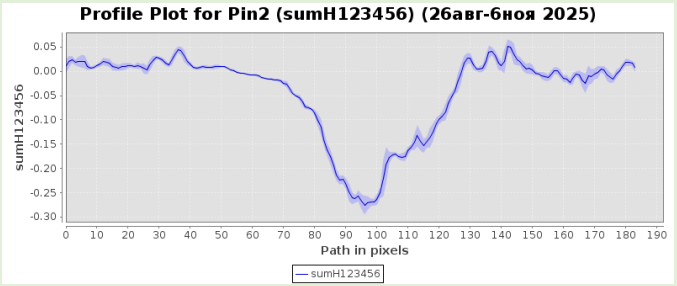
В целом, на всей исследуемой территории наблюдаются сорок с лишним подобных областей (количество таких областей зависит от того, что следует считать отдельной областью оседаний), в которых максимальная величина оседаний за 72 дня колеблется от 5 до 30 см.

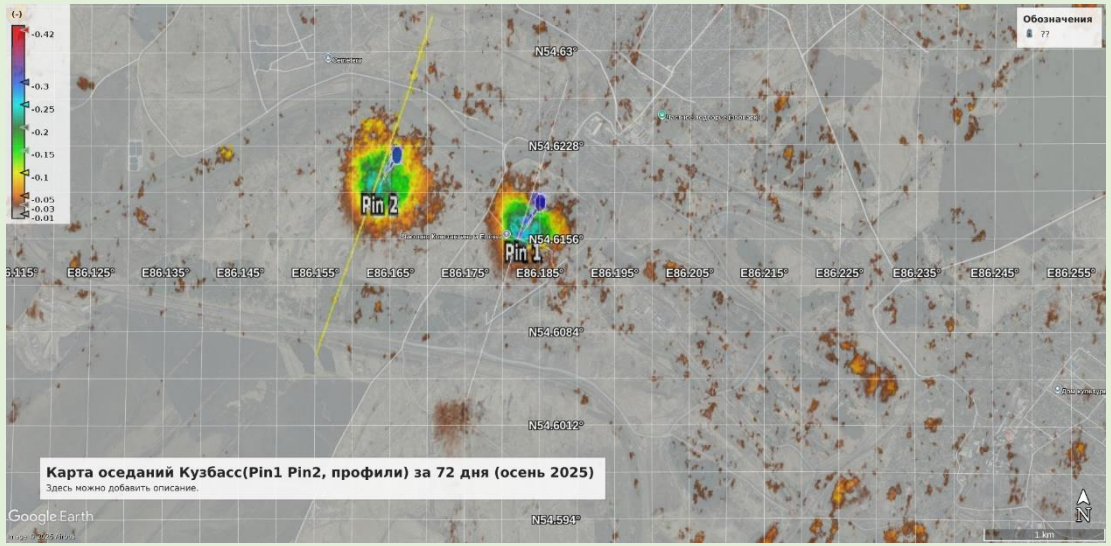
Две мульды сдвижения южнее г. Ленинск – Кузнецкий по снимкам спутника Sentinel-1C с 26 августа по 6 ноября 2025 г.



Слева - оседания двух мульд южнее г. Ленинск- Кузнецкий в долях м. на карте GoogleEarth.
Ниже показаны профили через эти мульды. Оседания за 72 дня достигают 35 см.





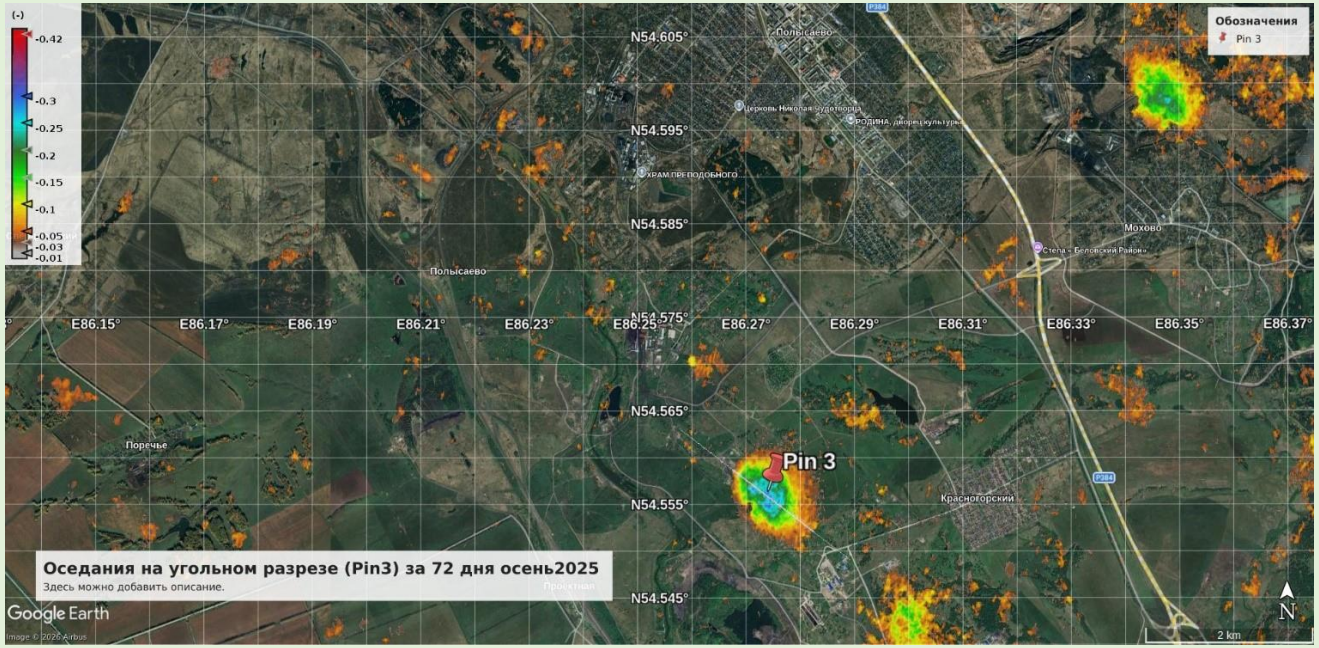


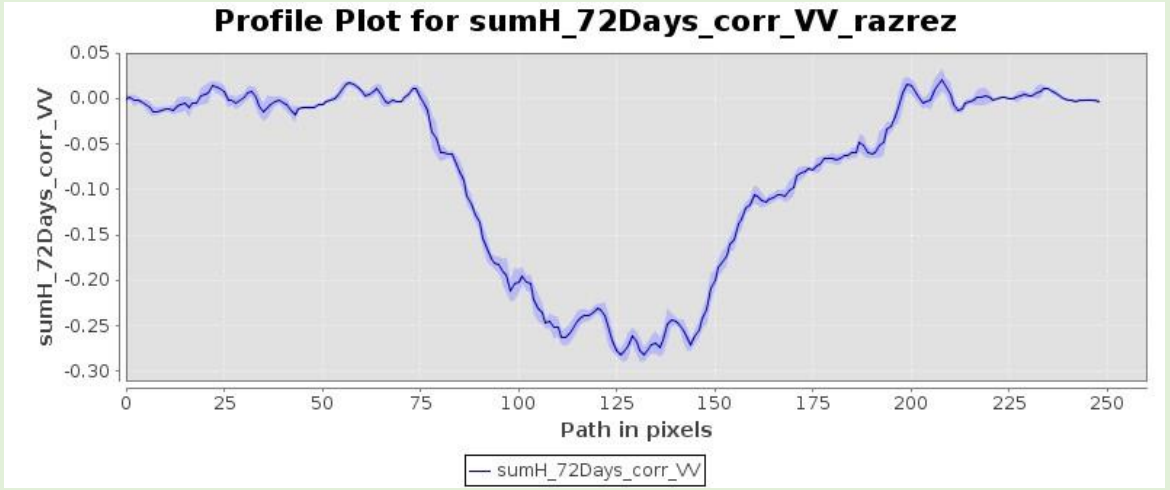
Слева – карта оседаний на ту же область. Важно отметить, что серый цвет показывает обширные области, где оседания за период мониторинга не зафиксированы.

Последующий мониторинг покажет, происходят ли оседания в том же месте, тогда глубина мульды будет возрастать или мульда будет двигаться вслед за забоем и области оседаний сместятся далее по ходу его движения.

Область оседаний с величиной более 2 см за 72 дня на угольном разрезе южнее поселка Полысаево.

Величина максимального оседания за 72 дня на данном разрезе составляет 28 см.

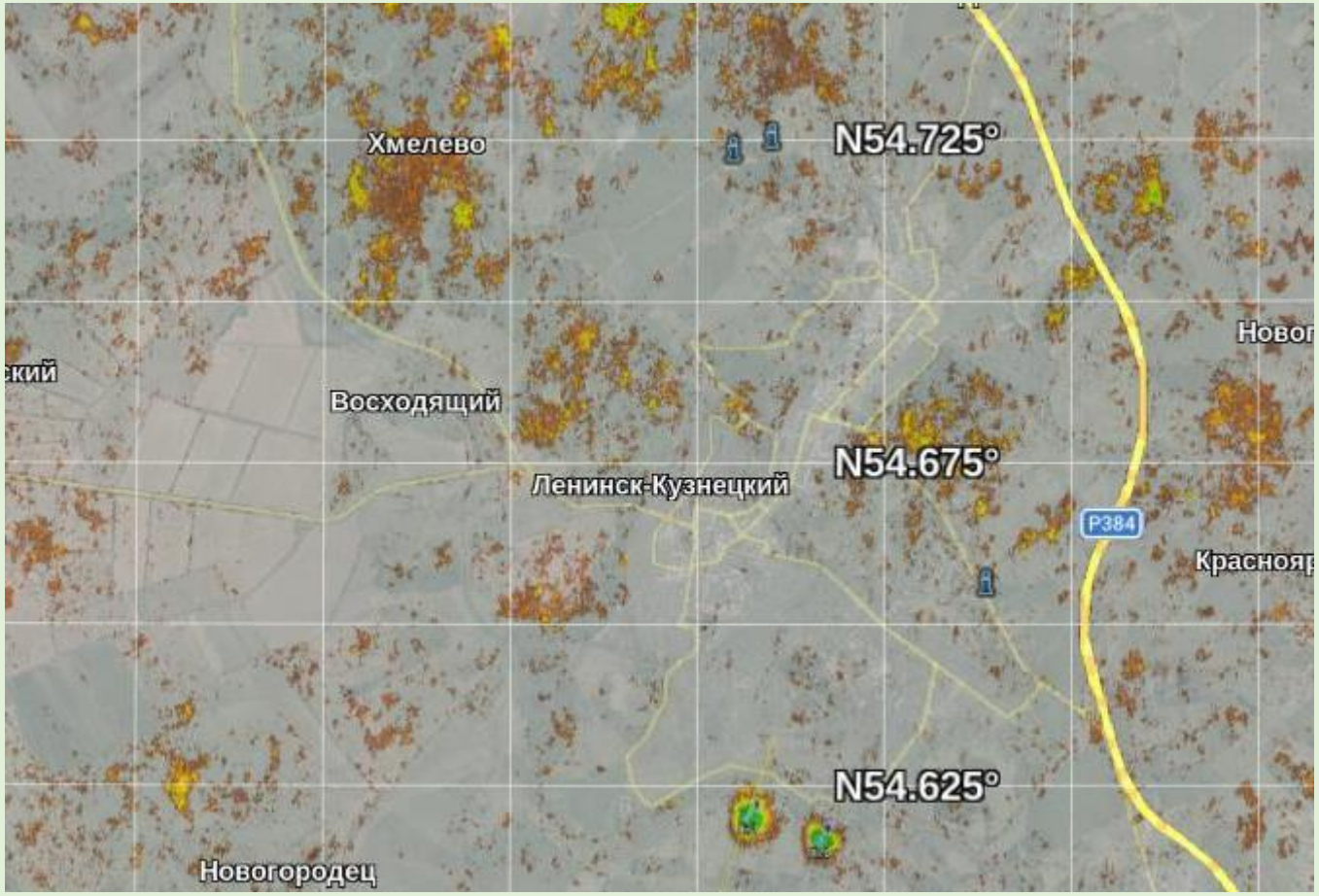




Цветовая шкала в долях метра

График смещений по профилю, пересекающему мульду сдвижения, помеченную меткой Pin 3 на рис. слева.

Карта смещений вокруг г. Ленинск - Кузнецкий



Серый и светло-коричневые тона показывают области с оседаниями менее 2 см за 72 дня.

Карта показывает, что на уровне точности спутниковых данных смещения в пределах городской застройки в г. Ленинск-Кузнецкий за период мониторинга не зафиксированы.

Выводы
по результатам мониторинга окрестностей г. Ленинск-Кузнецкий

За относительно короткий период мониторинга оседания в некоторых мульдах сдвижения осенью 2025 г. достигали 35 см за 72 дня. 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 35 см за 72 дня. Мониторинг на более длительных интервалах времени позволит прослеживать перемещение мульд сдвижения по поверхности и вовремя фиксировать их приближение к значимым инфраструктурным объектам, таким как дороги, поселки, промышленные предприятия, жилые дома.

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, позволяет прогнозировать возможные 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 напряженно-деформированного состояния подработанных массивов горных пород, что позволяет давать прогноз на основе планов проведения дальнейших горных работ (Бабаянц и др., 2023; Барях и др., 2023, 2025).

Литература

1. *Бабаянц И.П., Михайлов В.О., Тимошкина Е.П., Барях А.А.* Соотношение амплитуды и геометрии мульды сдвижения, определяемых по спутниковым радарным снимкам с одной или двух орбит // Геофизические исследования. 2023. Т. 24. № 4. С.28-42. doi.org/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 журнал 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-технические 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 // Геофизические исследования 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 // Журнал 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) // Вестник НЦ ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2024. №3. С. 34-43. DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.87.44.004.
9. *Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б. и др.* Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 // Физика Земли. 2010. №2. С. 3-16. DOI: 10.1134/S1069351310020011.
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.org/10.1134/S1069351314040107.
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 // Вычислительные технологии. 2016. Вып. 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 // Исследование Земли из космоса. 2012. Вып. 4. С. 26-29.
14. *Ferretti A.*, Satellite InSAR Data: reservoir monitoring from space. EAGE, 2014. 178 p.
15. *Massonnet D., Souyris J.-C.*, Imaging with synthetic aperture radar. EFPL Press, 2008. 280 p.
16. *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, No. 88 (Iss.3), 2000. P. 333–382.
17. *Hanssen R.N.*, Radar interferometry — data interpretation and error analysis. Kluwer Academic Publishers, 2001. 308 p.
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 // Journal of volcanology and geothermal research, 2022. V. 427, P. 107554, doi/10.1016/j.jvolgeores.2022.107554.