

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук**

На правах рукописи



Бабаянц Игорь Павлович

**ПОЛЯ СМЕЩЕНИЙ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ:
МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ**

Специальность 1.6.9. Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в лаборатории комплексной геодинамической интерпретации наземных и спутниковых данных (502) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Научный руководитель: **Михайлов Валентин Олегович** – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией комплексной геодинамической интерпретации наземных и спутниковых данных (502) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

Официальные оппоненты: **Родкин Михаил Владимирович** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.

Евсеев Антон Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических процессов освоения георесурсов «Горного института Уральского отделения РАН» – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга "АЭРОКОСМОС".

Защита диссертации состоится **15 февраля 2024 г. в 14:00 часов** на заседании Диссертационного совета 24.1.132.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института <https://ifz.ru/>. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru/main> и на сайте ИФЗ РАН <https://ifz.ru/>.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр.1, ИФЗ РАН, ученому секретарю Диссертационного совета Жосткову Руслану Александровичу.

Автореферат разослан «___» декабря 2023 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Спутниковая радарная интерферометрия получает все более широкое применение при изучении природных и техногенных процессов. Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) осуществляют непрерывную съемку земной поверхности, независимо от времени суток и погодных условий. Интервал между повторными съемками одного и того же участка местности составляет 6-12 дней. Получаемые по РСА снимкам интерферограммы позволяют проводить оперативный мониторинг смещений земной поверхности, и строить с их использованием численные модели природных и техногенных процессов. В тоже время, в области обработки спутниковых РСА снимков и интерпретации получаемых полей смещений остается еще много нерешенных проблем, часть из которых рассмотрена в данной диссертационной работе. Этим определяется актуальность темы исследований.

Степень разработанности темы исследования. Теоретические и методические основы РСА интерферометрии активно разрабатываются в последние 20-30 лет. Методы расчета и анализа парных интерферограмм (дифференциальная интерферометрия – DInSAR) все больше замещаются более сложными методами анализа серий РСА снимков (различные модификации методов устойчивых отражателей). Разрабатываются открытые и коммерческие программные пакеты, которые в благоприятных условиях (невозмущенная атмосфера, хорошая когерентность, т.е. степень сходства повторных снимков, отсутствие или небольшая мощность снежного и растительного покрова, пологий рельеф, большие смещения) позволяют рассчитать интерферограммы и получить поля смещений даже начинающему пользователю. Однако такие ситуации бывают редко. В большинстве случаев атмосферные помехи, низкая когерентность значительных территорий из-за густой растительности или сезонных сельхоз работ, малое отношение сигнал/шум и другие факторы требуют разработки специальных подходов к обработке снимков, к фильтрации и развертке интерферограмм, и получению устойчивых оценок полей смещений. Этим вопросам в мировой литературе ежегодно посвящаются многие десятки публикаций. В Российской Федерации число работ по применению РСА интерферометрии в последние годы постепенно увеличивается. Теоретические и методические вопросы обработки и интерпретации кроме ИФЗ РАН разрабатывают акад. РАН В.Г. Бондур и его сотрудники в НИИ «АЭРОКОСМОС», А.И. Захаров, Л.Н. Захарова и их коллеги из Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ю.А. Кашников и его коллеги (Пермский национальный исследовательский политехнический университет), Т.Н. Чимитдоржиев (Институт физического материаловедения СО РАН), В.Г. Коберниченко, А.В. Сосновский (Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина), А.В. Евтюшкин и его коллеги из Балтийского федерального университета имени И. Канта. В диссертационной работе предложены и обоснованы численными расчетами по данным за 2020-2022 гг. два эффективных метода обработки спутниковых РСА снимков, которые позволяют проводить регулярный мониторинг оседаний земной поверхности в сложных условиях Пермского края.

В области интерпретации полей смещений диссертационная работа продолжает основную линию работ лаборатории 502 ИФЗ РАН – интерпретацию геофизических, геодезических и геологических данных на основе численных моделей исследуемого природного или техногенного процесса. Эта методология начала разрабатываться сотрудниками лаборатории еще в середине 70-х годов и имеет целый ряд преимуществ. Если численная модель исследуемого процесса достаточно детально описывает различные стороны его развития, то в ее рамках можно согласовать практически все имеющиеся данные, а обратная задача сводится к определению конечного набора параметров этой модели (обзор дан в работе [Михайлов и др., 2007]). В настоящее время эта методология все шире используется в мировой практике.

Так, исследуя последствия катастрофического землетрясения в Турции, произошедшего 6.02.2023 г., в период написания данной работы, с применением спутниковых данных и модели смещений по разрыву в сферической радиально расслоенной планете были определены смещения земной поверхности, построена модель поверхности разрыва и определены косейсмические смещения на ней. Без применения геодинамического подхода, построить модель поверхности сейсмического разрыва не удастся. На основе моделей оседаний над подземными горными выработками и подземными хранилищами газа (ПХГ), выполнен анализ точности определения оседаний по РСА-снимкам, полученным при съемке территории с одной или совместно с двух орбит.

Целью данной работы являлось развитие методов обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии и их применение при изучении полей смещений природных и техногенных объектов, а также теоретический анализ точности определения оседаний над подземными горными выработками и ПХГ.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Разработать технологию обработки спутниковых данных для регулярного мониторинга смещений земной поверхности над подземными горными выработками в г. Березники и г. Соликамск (Пермский край, РФ) с учетом специфики исследуемых объектов – наличия обширных некогерентных областей.

2. Используя разработанную технологию и спутниковые снимки за период 2020-2022 гг., выявить основные активные области оседаний, проанализировать динамику развития процессов оседания, выявить опасные зоны, в которых отмечается увеличение скорости оседаний, либо новые области оседаний.

3. Рассчитать теоретические смещения над горными выработками и подземными хранилищами газа (ПХГ), и сопоставить их с величинами смещений, которые могут быть получены при съемке с одной или совместно с двух орбит. Оценить возможные погрешности расчетов и сопоставить их с величиной оседаний.

4. Используя методы дифференциальной интерферометрии, метод офсетов и спутниковые снимки, полученные до и после катастрофического землетрясения в Турции 6.02.2023 г., рассчитать смещения земной поверхности, построить модель поверхности сейсмического разрыва, сопоставить ее с моделями других исследователей и изучить постсейсмические смещения.

Методология и методы исследования. В работе получили развитие методы оценки смещений на природных и техногенных объектах, в том числе в условиях, сложных для РСА-интерферометрии (лесные массивы, заброшенные территории, густая растительность) с использованием снимков спутников Sentinel-1A/B и TerraSAR-X. Для исследования смещений применены: метод дифференциальной интерферометрии (DInSAR); при анализе серии снимков – методы точечных отражателей (IPTA) и малых базовых линий SBaS; при исследовании землетрясений в Турции – метод офсетов. Полученные методом офсетов смещения в пикселях (в координатах снимка) переводят в метры и далее – в наземные координаты. Поскольку орбита спутника Sentinel-1A отклоняется от направления север–юг не более чем на 10° , эти смещения близки к смещениям в северном и восточном направлениях. Точность метода оценивается не хуже, чем $1/20$ размера пикселя, т.е. составляет около 1 метра для снимков спутника Sentinel-1A. Поэтому метод офсетов применяется для областей со смещениями в первые метры и более, как, например, в очаговой области крупного землетрясения.

На основе данных о смещениях в очаговой области строится модель поверхности разрыва. Для землетрясения 6.02.2023 в Турции, использовано решение задачи о смещениях на поверхности сферической, радиально расслоенной планеты в результате сдвига по падению и простирацию на расположенной на заданной глубине прямоугольной площадке [Pollitz, 1996]. Решение получено под регуляризирующим условием близости направления смещений к чистому сдвигу.

Численное решение задач о величинах смещений над подземной горной выработкой получено на основании использования классической (инженерной) модели оседаний земной поверхности [Указания..., 2001]. Для расчета компонент смещений над ПХГ модифицировано известное решение задачи теории упругости [Geertsma, 1973].

Научная новизна и практическая значимость исследования.

1. Разработана и обоснована численными расчетами технология обработки спутниковых РСА-снимков методом дифференциальной интерферометрии и определения полей смещений в условиях обширных низкокогерентных областей. Сопоставление полученных результатов с наземными данными, включая геодезические измерения, показывает их хорошую сходимость. По результатам мониторинга 2020-2022 гг. выделены области ускорения оседаний земной поверхности в пределах г. Березники и г. Соликамск, на которые следует обратить повышенное внимание.

2. Смещения земной поверхности, рассчитанные по теоретической модели мульды сдвижения при отработке месторождений длинными очистными забоями (лавами), сопоставлены со смещениями, которые могут быть получены при мониторинге этой мульды по спутниковым снимкам с одной и двух орбит. Показано, что при использовании данных с одной орбиты продольная ось мульды сдвигается на 50-60 м в сторону спутника (т.е. на запад для восходящей орбиты и на восток для нисходящей орбиты). Ошибка в восстановлении величины оседаний не превышает 10%. При наличии данных совместно с двух орбит, оси мульды сдвижения определяются точно, погрешности в восстановлении геометрии мульды появляются только там, где имеются значительные горизонтальные смещения в северном направлении.

3. Используя модель смещений земной поверхности над ПХГ, рассчитаны теоретические векторы смещения по трем направлениям при отборе газа из пласта. По этим данным определены компоненты смещений на спутник при съемке с одной или совместно с двух орбит. Сопоставление полученных результатов показало, что ошибки расчёта вертикальной и восточной компонент смещений по данным с двух орбит не превосходят 10 мм, т. е. находятся на уровне точности метода РСА-интерферометрии.

4. По спутниковым радарным снимкам рассчитаны поля смещений методами DInSAR и офсетов в результате землетрясения в Турции, произошедшего 6.02.2023 г., а также постсейсмические смещения. Построена модель поверхности разрыва и оценены величины смещений на различных ее участках. Впервые показано, что на севере разрыв землетрясения 2023 г. перекрывается с областью разрыва землетрясения, произошедшего в 2020 г., что указывает на отсутствие запертого участка между очаговыми областями этих землетрясений. В модели [Barbot et al., 2023], такой участок имеется, что позволило авторам этой модели сделать предупреждение о возможном скором землетрясении в этой области. До настоящего времени предсказанное событие не произошло. На южном окончании модели поверхности разрыва обнаружен дефицит косейсмических смещений в верхней части земной коры. Там произошло землетрясение магнитудой M_w 6.3, поле смещений которого зафиксировано на дифференциальной интерферограмме за следующие 12 дней.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Для территорий с обширными некогерентными областями разработана технология оценки полей смещений земной поверхности по спутниковым радарным снимкам методом дифференциальной интерферометрии, включающая два метода, которые дополняют друг друга и позволяют одновременно оценивать смещения в высоко когерентных и низко когерентных областях.

2. Результаты мониторинга движений на подрабатываемых территориях гг. Березники и Соликамск на основе разработанных технологий и метода анализа временных рядов оседаний, позволившие определить скорости смещений на территории горных отводов, включая провалы, выявить области стабилизации и ускорения оседаний что важно для разработки мер по защите горных выработок и планирования отселения из опасных районов.

3. Оценки точности расчета смещений земной поверхности по данным с одной и двух орбит над подземными хранилищами газа (ПХГ) и калийными рудниками, впервые полученные с применением геомеханических моделей.

4. Новая модель поверхности разрыва землетрясения в Турции, произошедшего 6.02.2023 г. и постсейсмических процессов, полученная на основе методов дифференциальной интерферометрии и метода офсетов.

Личный вклад. Автором предложена и совершенствовалась в процессе практического применения технология оценки полей смещений земной поверхности по спутниковым радарным снимкам методом дифференциальной интерферометрии для территорий с обширными некогерентными областями, включающая два метода. Для районов гг. Березники и Соликамск выполнены: сбор базы радарных спутниковых

снимков, их интерферометрическая обработка в различных модификациях методов DInSAR и устойчивых отражателей, и оценка полей смещений. Выполнен анализ временных рядов оседаний, позволивший выявить области стабилизации, замедления и ускорения оседаний и оценить эффективность мер по защите горных выработок. Оценки точности расчета смещений земной поверхности по данным с одной и двух орбит над подземными хранилищами газа (ПХГ) и калийными рудниками, полученные с применением геомеханических моделей, выполнены совместно с научным руководителем. Выполнен расчет полей косейсмических смещений для области землетрясения, произошедшего 6.02.2023 г. в Турции. Построение модели поверхности разрыва выполнено совместно с В.О. Михайловым, Е.П. Тимошкиной, а интерпретация результатов выполнялась также при участии В.Б. Смирнова и М.С. Волковой.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов подтверждается их согласованностью с данными наземной геодезии, и достигается, в том числе, путем взаимной верификации данных, полученных по снимкам с различных спутниковых миссий, оборудованных РСА с длинами волн различных диапазонов (Sentinel-1, TerraSAR-X), и с применением различных методов выделения деформационных сигналов. Модель поверхности разрыва землетрясения 6.02.2023 г. в Турции в целом согласуется с результатами других авторов и данными наземных наблюдений.

Апробация работы. Результаты представлены на 7-ми научных конференциях, в том числе международных (всего 7 докладов): 18-я, 19-я и 20-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (16 – 20 ноября 2020 г., 15 – 19 ноября 2021 г., 14 – 18 ноября 2022 г.); FRINGE 2021, Нидерланды, 31 мая–4 июня 2021 г.; European Geosciences Union General Assembly 2021, Вена, Австрия, 19-30 апреля 2021 г.; Ломоносовские чтения, МГУ, 2023 г., 3-ей конференции ИТПЗ РАН «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», Москва, 2023 г.

По теме диссертации опубликовано 6 работ, все в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований (3 – в списке Web of Science, 3 – в Scopus).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. В диссертации 126 страниц текста, 48 рисунков, 3 таблицы. Список литературы включает 97 наименований.

Благодарности. Автор диссертационной работы выражает благодарность научному руководителю – чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессору Валентину Олеговичу Михайлову, а также коллегам из ИФЗ РАН: М.С. Волковой, Е.П. Тимошкиной, В.Б. Смирнову. Автор благодарит коллег из Горного Института УрО РАН за важные дискуссии, советы и предоставленные материалы. Также автор благодарен Европейскому космическому агентству (ESA) за возможность использования снимков со спутников Sentinel-1A/B, Немецкому центру авиации и космонавтики (DLR) за снимки со спутников TerraSAR-X, и группе швейцарских коллег – разработчиков программного комплекса GAMMA Software.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблематики исследования, сформулированы цели и задачи работы, защищаемые научные положения, кратко описаны методы исследования, отражена научная новизна и практическая значимость результатов работы.

Глава 1. Основные проблемы оценки полей смещений по данным спутниковой радарной интерферометрии и их интерпретации. Рассмотрены общие принципы радиолокационной съемки радарными с синтезированной апертурой (РСА) и используемые для выполнения данной диссертационной работы спутниковые системы. Выполнен критический обзор основных методов обработки спутниковых снимков – дифференциальной интерферометрии (DInSAR), методов малых базовых линий (SBaS), точечных целей (IPTA) и офсетов. Обоснована постановка задачи исследований.

В разделе 1.1 приведены технические характеристики спутников Sentinel-1A, Sentinel-1B, TerraSAR-X, снимки которых были использованы для расчетов смещений земной поверхности. Введены основные понятия спутниковой РСА интерферометрии, описаны основные этапы обработки пар снимков в методах дифференциальной интерферометрии (DInSAR), обсуждаются главные проблемы расчета полей смещений, включая введение поправок, устранение атмосферных эффектов, фильтрацию случайных помех, развертку фазы. Эта информация создает базис для разработки технологии, включающей методы *Std* и *Step* (глава 2).

В разделе 1.2 рассмотрены методы обработки спутниковых РСА-изображений, под общим названием – методы устойчивых отражателей (PSInSAR), основанные на использовании серии снимков (SBaS, IPTA). Для их успешной реализации необходимо иметь не менее 12-15 снимков исследуемой территории. Преимуществом этих методов является возможность итеративного уточнения используемых моделей смещений и ЦМР, а значит, и уточнение вычисляемых смещений земной поверхности. Также существует возможность учитывать атмосферную компоненту, которая некоррелирована во времени, поскольку меняется от снимка к снимку. В результате, помимо карт средних скоростей оседаний земной поверхности, можно использовать временные ряды – поведение устойчивых отражателей во времени, и по ним оценивать изменения скорости смещений. Точность этих методов оценивается в первые мм/год.

Раздел 1.3 содержит описание метода офсетов. Недостаток вышеперечисленных методов состоит в том, что фаза отраженного сигнала свернута по модулю 2π и для получения поля смещений ее необходимо развернуть, т.е. добавить необходимое число полных периодов. Задача развертки не имеет единственного решения, поэтому она выполняется под условием, что поле смещений является гладким и смещения в соседних пикселях отличаются не более чем на половину длины волны (для спутников Sentinel-1A она составляет 2.78 см). В случае смещений величиной в метры и более, на ограниченном участке, процедура развертки будет выполнена с ошибками или не выполнена вовсе. Метод офсетов основан на расчете функции кросс-корреляции амплитудной части снимков в скользящих окнах и не требует развертки фазы. Положение максимума двумерной функции кросс-корреляции определяет офсет (смещение) по азимуту и дальности в

координатах снимка. Метод офсетов применяется для областей со смещениями в первые метры и более, как, например, в очаговой области крупного землетрясения.

Выводы по главе 1. Для высокоточного мониторинга смещений природных и техногенных объектов необходимо разработать технологии обработки спутниковых снимков, дающие наилучший результат в конкретных условиях изучаемой площади или объекта. Для создания оптимального графа обработки в сложных условиях Пермского края были исследованы различные варианты расчетов с различным выбором основных параметров. Для метода DInSAR таковыми являются: размер осредняющего окна (мультилукинг), выбор порога когерентности, поиск оптимальной ЦМР, настройка пространственной фильтрации, алгоритм разворачивания фазы и т.д. Для методов устойчивых отражателей необходимо выбрать критерии отбора точек-кандидатов (устойчивых отражателей, характеризующихся стабильностью в течение периода съемки), выбор фильтрации, настройка пороговых значений, а также количество итераций для улучшения тех компонент, которые влияют на итоговую фазовую составляющую деформации. Для метода офсетов определяющим является выбор размеров скользящих окон, при этом также существует возможность итеративного улучшения результатов, используя последовательно уменьшающийся размер окна.

Глава 2. Технология оценки оседаний на подработанных территориях в г. Березники и г. Соликамск. Дано краткое описание способа разработки месторождений калийных и магниевых солей, расположенных под городами Березники и Соликамск и в их окрестностях, а также происходящих вследствие затопления выработанных пространств оседаний земной поверхности. Сложившаяся ситуация требует проведения постоянного мониторинга как имеющихся областей оседаний, так и территорий над действующими и ликвидированными шахтами, с целью выявления потенциально опасных зон. Приводится характеристика исследуемой территории и изложены разработанные автором методы, позволяющие проводить эффективный спутниковый мониторинг оседаний земной поверхности.

В разделе 2.1 дано описание территории г. Березники. Сложность спутникового мониторинга состоит в наличии пересеченного рельефа, густых лесов и отгороженных заросших растительностью опасных территорий, создающих обширные некогерентные области, наличие мощного снежного покрова зимой, сокращающего период проведения наблюдений до 5-6 месяцев. В связи с развитием опасных техногенных процессов была поставлена задача организации и проведения постоянного спутникового мониторинга с регулярной оценкой смещений через небольшие интервалы времени, а также анализа временных рядов смещений за бесснежный период для определения динамики развития оседаний и эффективности применяемых защитных мероприятий. Решение этой задачи потребовало разработки нестандартных технологий обработки радарных снимков.

Раздел 2.2 посвящен описанию технологии обработки пар снимков для регулярного анализа смещений. Расчет по снимкам спутника TerraSAR-X проводился через 11 и 22 дня, т.е. для двух соседних по времени снимков и через один. Также каждые 11 дней вычислялись смещения за интервал времени в 33 дня по соответствующим снимкам, а при обнаружении временной декорреляции снимков, выполненных через 33 дня, методом

суммирования смещений результатов, полученных за интервалы в 11 и 22 дня. Такой вариант обработки был использован потому, что бóльшая часть исследуемой территории в целом стабильна и смещения за 11 дней имеют небольшую величину, т.е. разность фаз отраженных сигналов, вычисленная по паре снимков, сравнима с уровнем шумов. Разность фаз двух снимков, выполненных через 22 или 33 дня, имеет более высокое соотношение сигнал/шум, что облегчает процесс обработки и выделения полезного сигнала.

На рисунке 1 показана карта когерентности двух снимков спутника TerraSAR-X от 24 апреля и 16 мая 2022 г. Когерентность – это мера сходства (уровень декорреляции) двух изображений, принимающая значения от 0 (некогерентная область) до 1 (идеально когерентная область). В этот период растительность еще не очень густая, но, тем не менее, 43% всех пикселей имеют когерентность менее 0.2 (красные области) и эти пиксели не могут быть включены в расчеты, 22% пикселей имеют когерентность в диапазоне 0.2-0.3 (зеленые точки) и лишь примерно треть от общего числа точек, показанных синим цветом, обладает достаточно хорошей когерентностью, показывающей временную стабильность их отраженных сигналов.

Анализ карты когерентности показывает, что городская территория в целом имеет достаточно хорошую когерентность; напротив, огороженные опасные территории провалов в городской черте, а также залесённые территории – в целом некогерентны. Летом и осенью ситуация ухудшается – становится еще меньше высококогерентных пикселей, что дополнительно осложняет обработку спутниковых снимков.

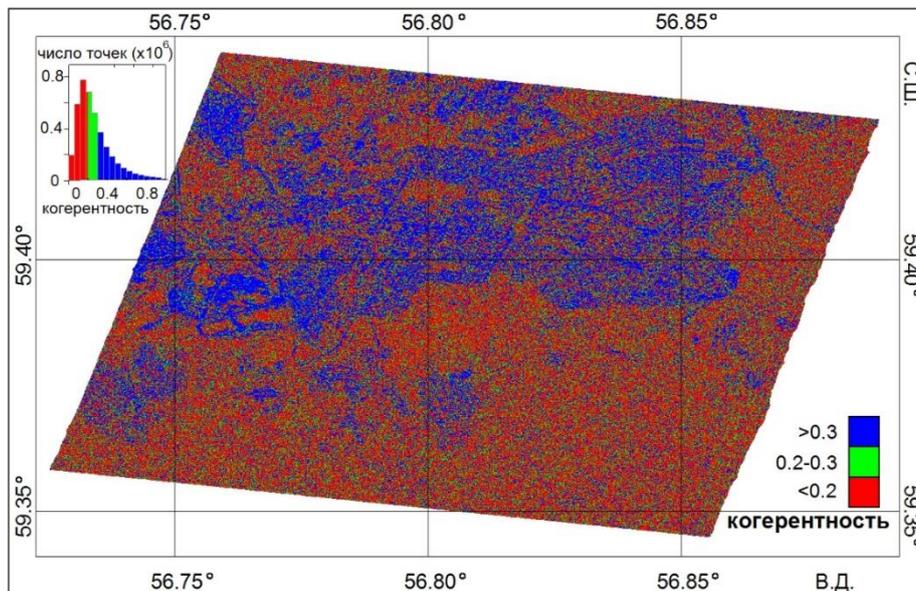


Рисунок 1 – Карта когерентности снимков спутника TerraSAR-X от 24 апреля и 16 мая 2022 г. на территорию г. Березники

Дополнительно осложняют обработку небольшие величины оседаний на большей части территории за интервалы 11 и 22 дня – там полезный фазовый «деформационный» сигнал может быть сопоставим с уровнем атмосферных помех или термических шумов аппаратуры, а при расчете за более длительный период теряется когерентность между снимками. Все это потребовало создания специальной технологии мониторинга,

основанной на комбинировании различных методов обработки спутниковых снимков. Технология основана на применении совместно двух методов, названных нами *Std* (является модификацией стандартных процедур метода DInSAR) и *Step* (пошаговый метод развертки фазы для создания референсной модели развернутой фазы). Метод *Std* разработан для определения смещений на когерентных отражающих площадках и не предназначен для развертки фазы и оценки смещений в низкокогерентных областях. За счет этого достигается «попиксельная» оценка смещений. Производится выбор мультилукинга с целью получения квадратного пикселя в наземных координатах. В качестве ЦМР используется модель Copernicus DEM (миссия Европейского космического агентства) с пространственным разрешением 30 м. Поскольку минимальный размер пикселя в наземных координатах для спутника TerraSAR-X в режиме съемки StripMap составляет примерно 3×3 м, а для спутника Sentinel-1 в режиме IW – 5×20 м, ЦМР была проинтерполирована в 8 раз. Корегистрация снимков выполняется с опорой на ЦМР. Затем вычисляется фазовая интерферограмма, из нее вычитается фазовая составляющая от ЦМР, в результате чего получается дифференциальная интерферограмма. Процедура развертки фазы дифференциальной интерферограммы учитывает когерентность между снимками и заключается в использовании растровой маски, в которой значения менее 0.2 запрещают развертку, а значения больше чем 0.2 являются весовой функцией развертки.

Проведенное исследование по применению фильтрации показало, что некогерентное осреднение – мультилукинг с фактором 4×1 по дальности и азимуту (с учетом предварительной интерполяции – оверсэмплинга по дальности) уменьшает высокочастотный спекл-шум снимка, но не исключает необходимости применения пространственного фильтра с небольшим окном осреднения. Несмотря на то, что обычно фильтрация выполняется до применения процедуры развертки фазы, наилучшие результаты были получены при фильтрации уже развернутой интерферограммы, с использованием пространственного минимально-квадратического фильтра с шириной окна не более 3-х пикселей. При наличии сильных атмосферных возмущений возникает необходимость устранения длиннопериодного (линейного или квадратичного) фона. Затем фаза, соответствующая деформационному сигналу, пересчитывается в смещения в направлении на спутник (LOS), либо, если есть основания полагать, что горизонтальные смещения невелики – в субвертикальные смещения.

Метод *Step* заключается в следующем. После расчета дифференциальной интерферограммы проводится ее мультилукинг (обычно с фактором 5 и по дальности, и по азимуту), это позволяет существенно упростить развертку фазы. Также, для дальнейшего расчета когерентности, проводится соответствующий мультилукинг корегистрированных снимков. Проводится развертка фазы, которая затем фильтруется и восстанавливается в геометрию исходного снимка. Затем из исходной дифференциальной интерферограммы вычитается развернутая интерферограмма, предварительно свернутая по модулю 2π , остаток снова некогерентно осредняется, разворачивается, фильтруется и добавляется к начальной развернутой фазе. Каждая последующая процедура уменьшает фазовый остаток (разность между исходной и подобранной разностью фаз двух снимков), обычно достаточно трех итераций. Так создается референсная фазовая модель. Далее выполняется

развертка исходной интерферограммы, но уже с учетом полученной ранее референсной модели. С одной стороны, это позволяет избежать грубых ошибок (включая региональный набег фазы) при выполнении неоднозначной процедуры развертки, с другой – развернутая фаза рассчитывается даже в тех областях снимка, в которых когерентность оказывается ниже выбранного порога. Далее, аналогично методу *Std*, рассчитанная фаза пересчитывается в смещения земной поверхности.

Преимуществом метода *Step* является получение полей смещений, более полно покрывающих территории исследований, включая области, где когерентность ниже заданного порога. Недостатком этого метода в ряде случаев является более сглаженная картина смещений. Методы *Std* и *Step* дополняют друг друга, позволяя получить более подробную карту смещений на территории г. Березники и г. Соликамск. В областях с хорошей когерентностью снимков эти методы дают близкие результаты.

По мере получения полей смещений проводится их суммирование. Поскольку орбитальные, атмосферные и др. помехи, как правило, некоррелированы во времени, суммирование серии снимков позволяет более надежно выделить области устойчивых смещений земной поверхности и подавлять помеховую составляющую [Dai et al., 2018].

Выводы по главе 2. Разработана технология анализа спутниковых снимков для оперативного мониторинга смещений земной поверхности в сложных условиях городских и пригородных территорий г. Березники и г. Соликамск. Ее эффективность доказана в процессе комплексного мониторинга в 2020-2022 годах. Данная глава обосновывает первое защищаемое положение: «Для территорий с обширными некогерентными областями разработана технология оценки полей смещений земной поверхности по спутниковым радарным снимкам методом дифференциальной интерферометрии, включающая два метода, которые дополняют друг друга и позволяют одновременно оценивать смещения в высоко когерентных и низко когерентных областях».

Глава 3. Результаты мониторинга движений на подрабатываемых территориях гг. Березники и Соликамск на основе разработанных технологий и метода анализа временных рядов оседаний. Здесь выполнен детальный анализ результатов мониторинга г. Березники и г. Соликамск за трехлетний период (с 2020 по 2022 годы), включая карты и временные ряды смещений.

В разделе 3.1 обосновывается выбор стратегии мониторинга указанных территорий. Методом расчета парных интерферограмм и их суммирования получены карты смещений земной поверхности в период съемки – с конца апреля до середины октября (в бесснежный период). Показано, что методы *Std* и *Step* в условиях хорошей когерентности показывают близкие результаты. В сложных условиях (низкая когерентность, атмосферные помехи и т.д.) более эффективным оказывался метод *Step*, который в основном и был использован для оценки смещений земной поверхности при мониторинге территории г. Березники, а метод *Std* использовался для верификации расчетов в когерентных областях. Для территории г. Соликамск, на которой отмечено еще меньше устойчиво когерентных зон, более предпочтительным оказался метод *Std*.

В разделе 3.2 выполнен детальный сравнительный анализ результатов мониторинга территории г. Березники, полученных по снимкам 2020 – 2022 гг. Поля смещений земной

поверхности, рассчитанные по обоснованной выше технологии, показаны на рисунке 2, где представлены средние скорости субвертикальных смещений (в м/год) и их сопоставление с наземными геодезическими наблюдениями для центральной части г. Березники в 2020 году. Основные оседания в центральной части города локализуются в двух областях – это затопленный провал у ж/д вокзала (рисунок 2, цифра 2) и автодорожное кольцо (рисунок 2, цифра 1) – по спутниковым данным, смещения на северо-восточном борту провала превосходят 500 мм/год, и сложной формы, вытянутая в широтном направлении, мульда оседаний, которая начинается севернее ул. Тельмана (рисунок 2, цифра 3), проходит через проспект Ленина и протягивается южнее, в сторону ул. Котовского (рисунок 2, цифра 4) – в этой области максимальные оседания достигают 300-350 мм/год.

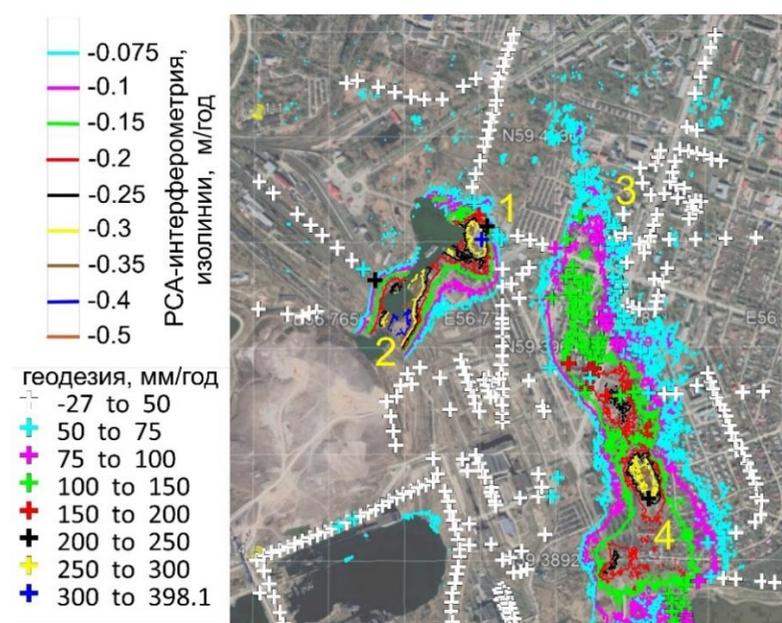


Рисунок 2 – Сравнение средних скоростей субвертикальных смещений (изолинии, в м/год) и вертикальных смещений по данным геодезии (символы «+») для центральной части г. Березники. Средние скорости смещений рассчитаны путем суммирования парных интерферограмм за период 187 дней 2020 г. В геодезических данных оседания положительные и показаны в мм/год

На южной окраине г. Березники, в пределах поселков Нартовка, Зырянка и Новая Зырянка (показаны цифрами 1, 2, 3 на рисунке 3), также выделяется две мульды оседаний. Одна из них протягивается от берега водохранилища, где оседания превосходят 150 мм/год, вдоль границы поселков Нартовка и Зырянка примерно с севера на юг, где оседания сначала уменьшаются до 100 мм/год, а затем – до 60–80 мм/год. Вторая мульда с величиной оседаний 70–80 мм/год протягивается с запада на восток в средней части поселка Новая Зырянка.

Трехлетний период мониторинга показал, что основные выделенные области в целом сохраняют скорость смещений или замедляются, что говорит об эффективности принимаемых мер по стабилизации зон оседаний. В то же время, область в районе проспекта Ленина показывает ускорение оседаний – примерно на 25%.

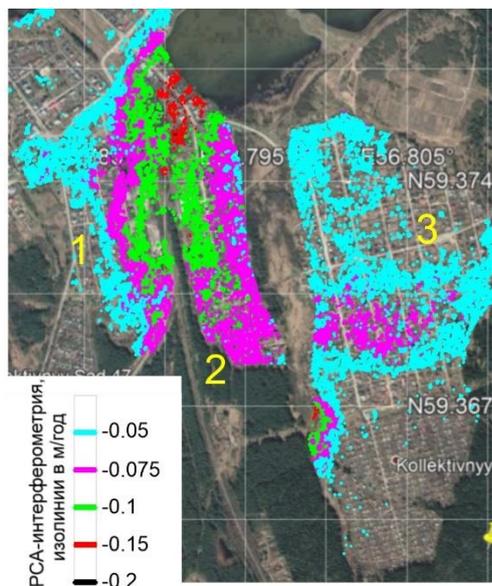


Рисунок 3 – Карта средних скоростей субвертикальных оседаний (м/год) южной окраины г. Берзеники, полученная путем суммирования парных интерферограмм, за период 187 дней в 2020 г.

В разделе 3.3 приводятся результаты оценки средних скоростей смещений с использованием методов устойчивых отражателей, которые позволяют оценивать смещения в отдельных, не связанных между собой, областях. На рисунке 4 показана карта субвертикальных смещений, полученная методом устойчивых отражателей по спутниковым снимкам 2021 г. Там, где методом устойчивых отражателей получены оценки смещений, результаты различных методов, хорошо согласуются (рисунки 2 и 3 Б), но методом устойчивых отражателей удастся определить меньше значений оседаний в низкокогерентных областях. С другой стороны, получить оценки смещений в изолированных областях (цифры 5, 6 и др. на рисунке 4) методом DInSAR не удастся.

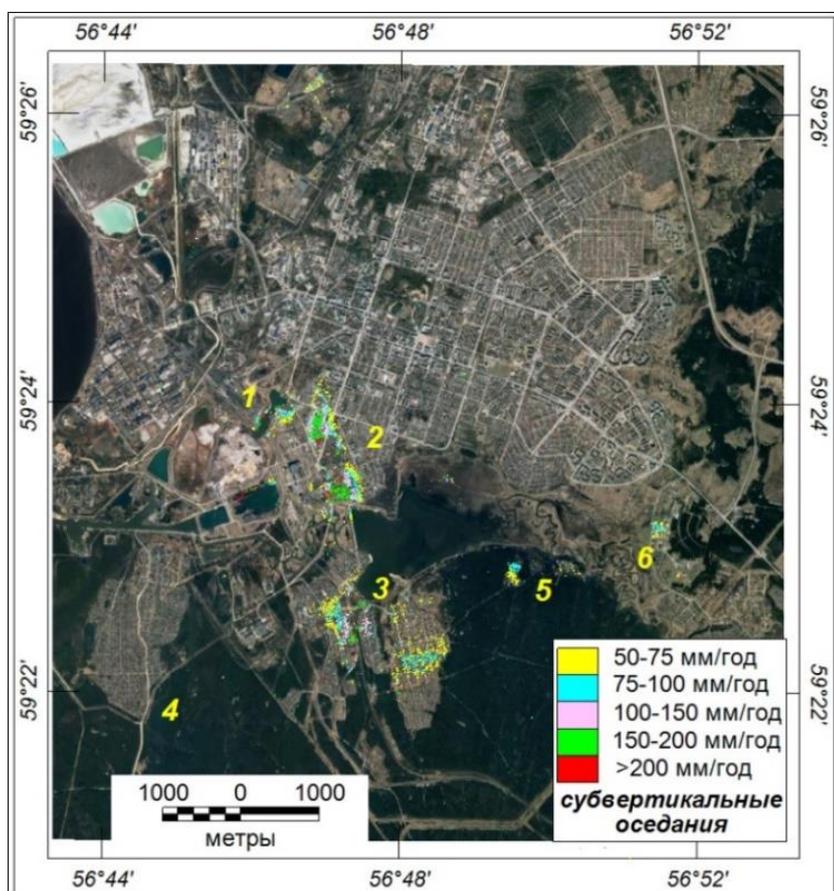


Рисунок 4 – Средние скорости оседаний устойчиво отражающих объектов (в мм/год) для центральной части г. Берзеники, полученные методом устойчивых отражателей в 2021 г.

Результаты сравнения данных РСА-интерферометрии и наземных геодезических измерений, проведенные по данным 2020 г., показывают, что для 90% точек, разность смещений, полученных этими методами (см. рис. 2), не превышает ± 2 см/год. Для расчета использовано 765 измерений на геодезических пунктах. Стандартное отклонение разности смещений составило 20 мм/год.

В разделе 3.4 приведены результаты площадного мониторинга смещений земной поверхности в пределах горного отвода рудника СКРУ-2 (г. Соликамск и его окрестности). На рисунке 5 представлена карта смещений за 165 дней 2021 года (пересчитана в м/год) и данные наземных геодезических наблюдений.

Смещения более 100 мм/год фиксируются только на поверхности солеотвала. Смещения в районе Родниковской птицефабрики (рисунок 5, цифра 2) близки к нулю, что совпадает с данными нивелировок. Смещения в области нового ствола СКРУ-2 (рисунок 5, цифра 6) и на дороге восточнее нового ствола также близки к нулю. На южной окраине г. Соликамска, в поселке Рубцово, как и в поселке Родники (цифра 1), и вдоль газопровода (цифра 7) на фоне близких к нулю смещений, фиксируются небольшие области оседаний до 40 мм/год. Эти области соседствуют с областями нулевых смещений и не образуют явно выраженных мульд оседания. Такие смещения, вероятнее всего, связаны с хозяйственной деятельностью. На территории СКРУ-2 (площадка севернее солеотвала) основные смещения близки к нулю. Отдельные области, со средней скоростью субвертикальных оседаний, достигающей местами 40 – 60 мм/год, в центре промышленной территории СКРУ-2, как и на солеотвале, вероятно, связаны с производственной деятельностью на поверхности.

Севернее сада Магний (рисунок 5, цифра 4) выделяется небольшая область оседаний со скоростью до 60 мм/год. Методом устойчивых отражателей здесь также получены оседания, но с несколько меньшей субвертикальной скоростью, до 40 мм/год. В целом, на большей части горного отвода существенных оседаний не зафиксировано.

Оседания в центральной части провала, расположенного в северо-восточном углу горного отвода, в основном составляют 20 – 40 мм/год, в отдельных точках до 60 мм/год (зеленый цвет) и 80 мм/год (пурпурный цвет). Такие же оседания зафиксированы южнее провала, в районе южной обходной дороги, а также на северо-западе провала. Здесь имеются геодезические профили, которые показали сходную величину оседаний (местами от 80 мм/год до 100 мм/год за период 07.2020 г. – 07.2021 г).

Отметим, что в районе провала ведутся активные работы по предотвращению дальнейших оседаний, в том числе ведется засыпка провала глинистым материалом, закачка глиноцементного раствора, ремонт дорог. Нивелировки проводятся по системам реперов, расположенных вне зоны наземных работ. РСА-интерферометрия фиксирует смещения во всех областях. Поэтому, непосредственно сопоставлять измерения на геодезических реперах с оценками смещений на грунтовых площадках проблематично. Однако отсутствие принципиальных расхождений вне зоны наземных работ указывает на то, что наземная геодезия и РСА-интерферометрия и здесь дополняют друг друга.

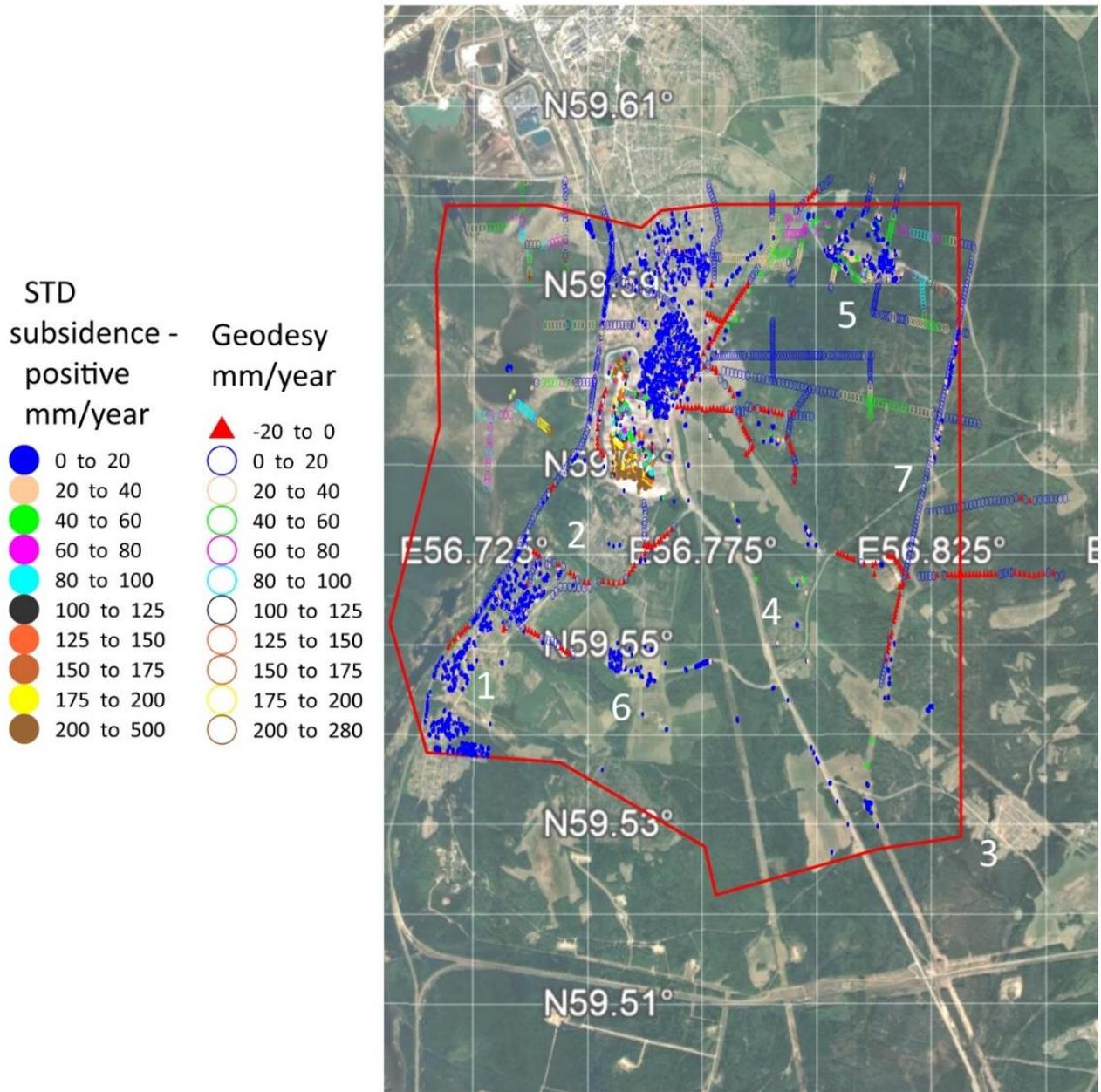


Рисунок 5 – Средние скорости оседаний, рассчитанные по методу Std по снимкам за период 165 дней 2021 г. (закрашенные окружности) и их сравнение по данным повторных нивелировок (цветные круги). Цифрами указаны: 1 – пос. Родники; 2 – Родниковская птицефабрика; 3 – пос. Усовский; 4 – сад Магний; 5 – провал; 6 – новый ствол СКРУ-2; 7 – газопровод. В северной части горного отвода расположен поселок Рубцово (южная окраина Соликамска). Названия взяты с сайта <https://www.openstreetmap.org>

В разделе 3.5 обсуждается методика анализа временных рядов оседаний на подрабатываемой территории г. Березники. Анализ процесса оседаний во времени даёт информацию об эффективности применяемых мер по защите горных выработок и наземной инфраструктуры. Особенно важно выявлять области, где оседания ускоряются, для проведения необходимых мероприятий, включая возможное расселение домов и ограждение опасных участков. Для решения этой задачи был использован следующий

метод. Сначала были отобраны все устойчиво отражающие объекты со средней скоростью оседаний более 20 мм/год. Временные ряды этих смещений аппроксимировались линейными и квадратичными функциями. Оценка качества аппроксимации позволила выбрать те отражающие площадки, в которых квадратичная функция (парабола) в 1.5 раза лучше аппроксимировала временной ряд. Из этой группы были отобраны те отражатели, в которых парабола выпукла вверх и ряд был аппроксимирован ее правой нисходящей, т.е. ускоряющейся ветвью. Далее вычислялось отношение оседания за вторую и первую половину периода съёмки и, если это отношение оказывалось больше 1.5, т.е. если имелось заметное ускорение, то этот отражатель оставлялся для последующего анализа. Результат аппроксимации временных рядов для устойчивых отражателей вокруг провала у ж/д вокзала показан на рисунке 6.

Судя по поправкам к ЦМР, почти все обнаруженные устойчивые отражатели, демонстрирующие ускорение, находятся на крышах строений. По всей вероятности, замедление погружения на 3–5 см в весенний период связано с повышением температуры и термическим расширением строений. Этот эффект не фиксируется геодезическими реперами, расположенными на грунте или в основании зданий.

Проведённый анализ позволяет заключить, что отмеченные ускорения вероятнее всего не связаны с процессами в подземном пространстве, и должны быть отнесены к сезонным факторам. К сожалению, из-за снежного покрова мы не располагаем данными за ноябрь-декабрь 2020-2022 гг., которые могли бы показать обратное движение при понижении температуры. Обнаруженный эффект может приводить к некоторому снижению оценок средней скорости оседания.

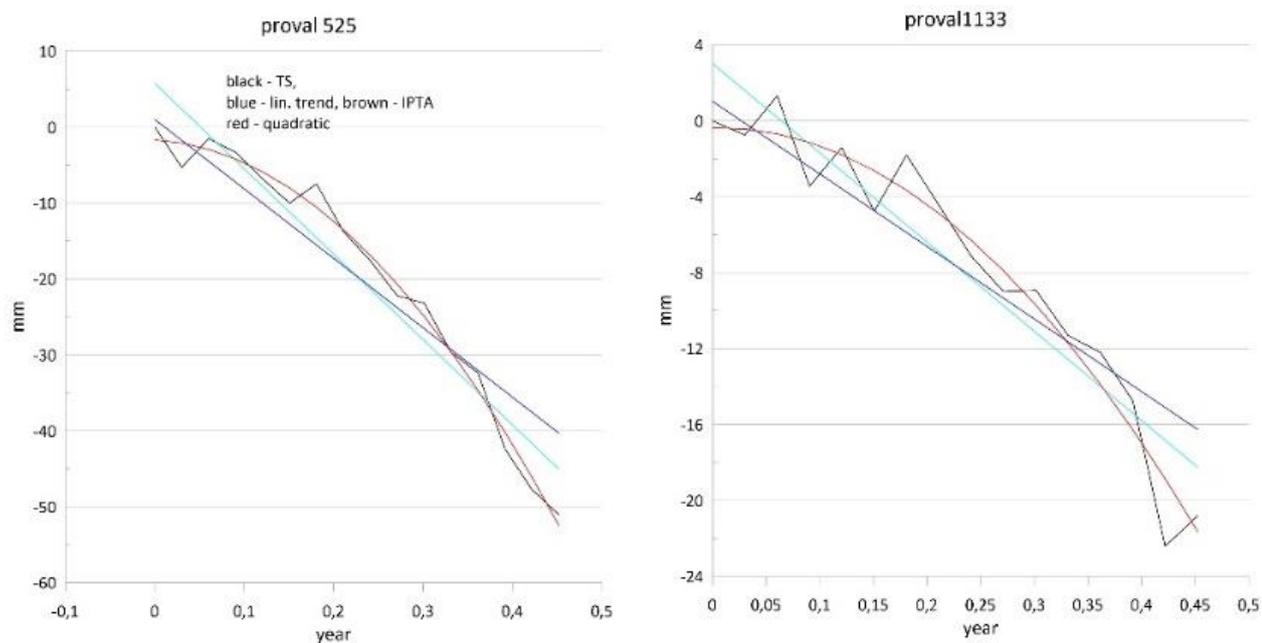


Рисунок 6 – Временные ряды смещений для устойчивых отражателей вокруг провала по снимкам 2021 г. Чёрная линия – временной ряд; голубая прямая – линейный тренд, построенный по временному ряду методом наименьших квадратов; синяя прямая – линейный тренд, вычисленный в программном комплексе GAMMA Software с учётом

поправок в ЦМР и на влияние атмосферы; коричневая кривая – квадратичная зависимость. На горизонтальных осях – время в долях года (ноль – 26.04.2021 г.)

Выводы по главе 3. Метод исследования смещений земной поверхности и объектов инфраструктуры путём суммирования парных интерферограмм и методы устойчивых отражателей дополняют друг друга. Суммирование не предполагает анализа смещений во времени, с фильтрацией короткопериодных по времени компонент, и с устранением атмосферных шумов и ошибок ЦМР. В тоже время, применяемый при построении парных интерферограмм метод *Step* позволяет получать карты смещений, которые более равномерно покрывают область исследований. Временные ряды дают оценки скоростей оседаний там, где они определяются наиболее надёжно. В областях, где результаты получены обоими методами, скорости оседаний хорошо согласуются.

Приведенные результаты обосновывают второе защищаемое положение: «Результаты мониторинга движений на подрабатываемых территориях гг. Березники и Соликамск на основе разработанных технологий и метода анализа временных рядов оседаний, позволившие определить скорости смещений на территории горных отводов, включая провалы, выявить области стабилизации и ускорения оседаний что важно для разработки мер по защите горных выработок и планирования отселения из опасных районов».

Глава 4. Оценки точности определения смещений земной поверхности над ПХГ и калийными рудниками по спутниковым снимкам с одной и двух орбит с применением геомеханических моделей. Описываются подходы к созданию численных моделей смещений земной поверхности, которые происходят при отборе газа или добычи руды. С помощью этих моделей рассчитаны три компонента вектора смещений, по вертикали, на север и восток, и смещения на спутник U_{Los} , которые могут быть получены при съемке с восходящей и нисходящей орбиты. Смещения на спутник использованы для расчета субвертикальных смещений по данным с одной орбиты и смещений по вертикали и на восток по данным с двух орбит (поскольку орбита спутника близка к полярной, а РСА-интерферометрия не фиксирует смещения параллельно орбите, смещениями на север при расчете с двух орбит пренебрегают). Далее анализируются расхождения смещений, полученных с одной и двух орбит, и исходных модельных смещений.

В разделе 4.1 рассмотрена модель подземного хранилища газа, близкая к реальному ПХГ, для которого ранее были проведены расчеты смещений по снимкам спутника Sentinel-1A. Для расчета компонент смещений используется известное решение задачи теории упругости о смещениях поверхности упругого полупространства в результате изменения давления в расположенном под поверхностью центре дилатации (малом сферическом объеме) [Geertsma, 1973]. Это решение проинтегрировано для получения эффекта от изменения давления в тонкой прямоугольной пластине. Далее, набором таких пластин по латерали был аппроксимирован пласт, который используется для закачки и отбора газа. В каждой пластине было задано теоретическое падение давления (рисунок 7 А). Были использованы модельные параметры, характерные для высокопористых песчаных слоев, толщина слоя – 100 м, глубина залегания – 350 м, горизонтальные размеры пластин равны 0.005° , а максимальное падение давления задано равным 1.6 МПа. Это позволило рассчитать теоретические компоненты смещения по трём направлениям

(рисунок 7 Б, Г, Д), а также теоретические смещения на спутник для съёмки с восходящей и нисходящей орбит, используя реальные углы наклона зондирующего луча и азимуты полёта (рисунок 7 В, Е).

На картах U_{LOS} смещения в основном отрицательные (т.е. «оседания»), но имеются и небольшие «поднятия» (смещения в сторону спутника). Они возникают там, где вклад горизонтальной компоненты смещений превосходит вклад вертикальной компоненты. Максимум в поле U_{LOS} всегда смещается относительно точки максимума смещений по вертикали (см. рисунок 8 Г) в сторону спутника, т. е. для восходящей орбиты — на запад (рисунок 8 В), для нисходящей орбиты — на восток (рисунок 8 Е). В дальней от спутника области возникает смещение противоположного знака. Максимальное вертикальное оседание в теоретической модели: -115.3 мм (рисунок 8 Г), максимальное значение U_{LOS} : -88.4 мм (рисунок 8 В и Е), смещения U_{LOS} на краях ПХГ достигают 10.0 мм.

Далее, полагая, что горизонтальные смещения не превосходят вертикальные, можно оценить субвертикальные смещения с каждой орбиты, получаемые делением смещений U_{LOS} на косинус угла наклона зондирующего луча. Максимумы субвертикальных оседаний для восходящей и нисходящей орбит смещены так же, как и на картах U_{LOS} (рисунок 8 В, Е). При максимальной величине вертикальных смещений 115.3 мм, субвертикальные смещения с восходящей и нисходящей орбит показывают несколько бóльшие значения, равные 125.4 мм (ошибка около 8%). Области поднятий на периферии ПХГ также сохранились. Максимальные погрешности фиксируются примерно в той же области, в которой достигают максимума смещения на восток (рисунок 8 Б), т. е. на западном и восточном бортах мульды оседаний.

Если смещения определены совместно по снимкам с восходящей и нисходящей орбиты, то возникает два уравнения с тремя неизвестными смещениями на север, восток и по вертикали, при этом смещения на север входят в уравнения с коэффициентом существенно меньшим, чем вертикальная и восточная компоненты. Если есть основания полагать, что северная компонента не превосходит значительно остальные компоненты, то ей можно пренебречь и определить смещения по вертикали и на восток. В работе показано, что при расчете смещений совместно с восходящей и нисходящей орбиты, ошибки расчёта вертикальной и восточной компонент смещений не превосходят 10 мм, т. е. находятся на уровне точности метода РСА-интерферометрии. Максимальное значение вертикальной компоненты смещений определено точно (-115.3 мм) и не смещено. Максимальные расхождения между теоретическими и расчётными значениями располагаются на северном и южном бортах мульды, в области максимума смещений на север. Расхождения достигают 5.8 мм при максимальном значении оседаний -115.3 мм, т. е. 5 %. Максимальная ошибка определения восточной компоненты смещений составила всего 0.08 мм при максимальном смещении восточной компоненты 37.0 мм.

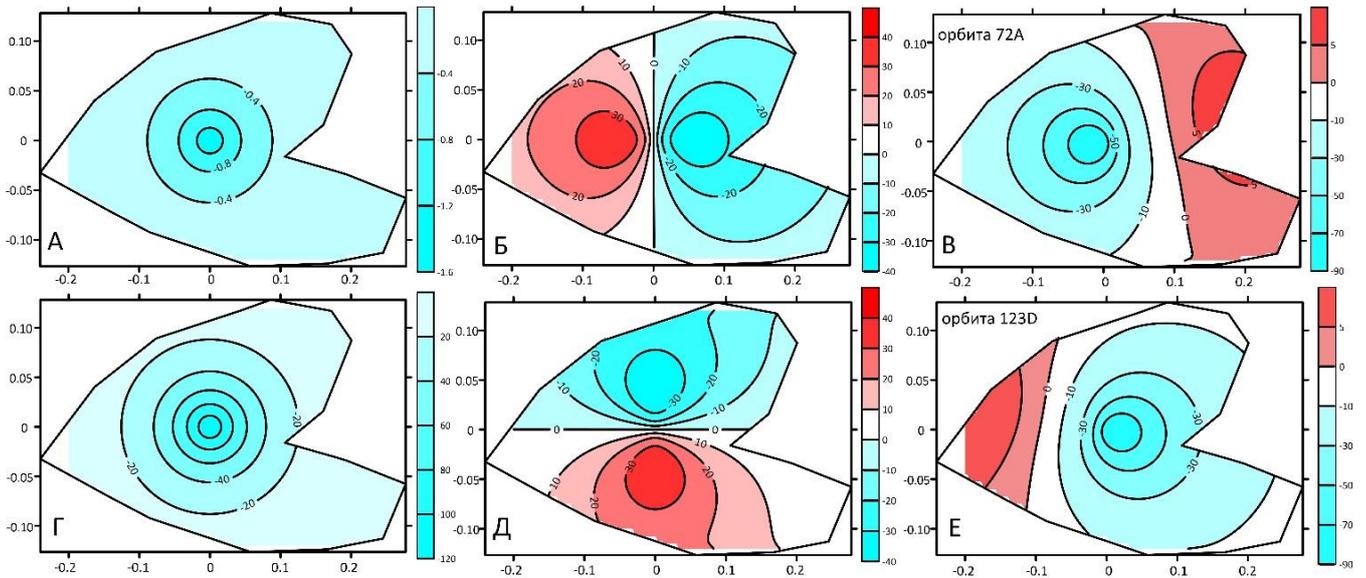


Рисунок 7 – Карта падения давления (в МПа) в результате отбора газа (А); карты компонент смещений (в мм): вертикальной (Г), восточной (Б), северной (Д) и в направлении LOS для восходящей (В) и нисходящей (Е) орбиты. Восходящая орбита проходит западнее ПХГ, нисходящая – восточнее. Оси – расстояние от области максимального падения давления (в град): 0.1° по широте соответствует примерно 11.1 км, по долготе – 7.9 км. Чёрный контур – границы модельного ПХГ

В разделе 4.2 приводятся результаты моделирования мульды оседания над калийными рудниками в зависимости от ориентации главных осей мульды. Как было показано в разделе 4.1, геометрия областей поднятия или оседания, которая определяется вертикальной компонентой U_z , в общем случае не совпадает с геометрией областей смещений в направлении на спутник U_{LOS} . Области положительных и отрицательных смещений на картах U_z и U_{LOS} в общем случае сдвинуты друг относительно друга, и экстремальные значения этих полей также различаются. Это затрудняет определение точного положения мульды сдвижения по картам U_{LOS} . Важно определить, в каком направлении сдвигаются оси областей оседания над рудниками относительно их истинного положения и какие возникают ошибки в оценке величины оседаний при использовании снимков с одной или совместно с двух орбит.

В качестве расчетной модели использована инженерная (классическая) модель оседаний земной поверхности над одиночной горной выработкой (лавой), которая задает эмпирические соотношения между параметрами лавы и геометрией мульды сдвижений на земной поверхности. Эта модель не дает точного решения, но вполне подходит для анализа соотношений величины и геометрии мульды оседания, определенных с одной или совместно с двух орбит.

Для модельной лавы были приняты следующие параметры, характерные для Старобинского месторождения калийных солей в Республике Беларусь: глубина лавы 600 м; размер отработанного блока равен 260 м; продвижение лавы составляет 900 м, что соответствует выработке примерно за полгода. Если задать вынимаемую мощность пласта равной 1.75 м, то, при указанных параметрах, максимальное оседание земной поверхности

в активной стадии процесса сдвижения составит 700 мм, максимальные горизонтальные сдвижения равны 220 мм.

Далее, используя тот же подход, что и для ПХГ, было показано, что положение осей мульды на картах смещений, рассчитанных по снимкам с одной орбиты, зависит от направления ее простирания. Если мульда имеет простирание С-Ю, то ее продольная ось смещается примерно на 50-60 м на запад на картах субвертикальных оседаний, полученных с восходящей орбиты и на восток на картах, полученных с нисходящей орбиты, относительно ее истинного положения на местности. Если мульда имеет простирание З-В, то ее продольная ось на картах субвертикальных оседаний не смещается, но область максимального оседания на этой карте смещается вдоль продольной оси на запад на картах, построенных по снимкам с восходящей орбиты, и на восток на картах по снимкам с нисходящей орбиты. Если мульда простирается в направлении СЗ-ЮВ, то на карте оседаний, полученной с восходящей орбиты, мульда сместится вдоль поперечной оси на ЮЗ и вдоль продольной оси на СЗ. На карте оседаний, полученной с нисходящей орбиты, мульда сместится вдоль поперечной оси на СВ и вдоль продольной оси на ЮВ. Также показано, что при расчетах оседаний с совместным использованием данных с нисходящей и восходящей орбиты, поперечная и продольная ось мульды не сдвигается. Максимальная величина оседаний определяется почти без погрешности. Погрешности в восстановлении геометрии мульды появляются там, где имеется значительная северная компонента смещений. Для мульды, вытянутой в направлении С-Ю и З-В – это северная и южная ее граница, для мульды вытянутой с СЗ на ЮВ – это ее самый северный и самый южный углы.

Выводы по главе 4. При использовании спутниковых снимков с нисходящей и восходящей орбиты, ошибка определения вертикальных смещений составляет 5-10 %, а смещений восточной компоненты – менее 1%. Положение области оседаний, рассчитанной по данным с двух орбит – не смещается, и ее геометрия не искажается. При расчете по снимкам с одной орбиты, величина вертикальных смещений определяется с погрешностью менее 10%, но области поднятий и оседаний оказываются сдвинутыми в сторону спутника относительно их истинного положения на 50-60 м.

Следовательно, расчёт компонент смещений по данным с двух орбит не должен приводить к сколь-либо существенным ошибкам при оценке вертикальной и восточной компонент вектора смещений в реальных ситуациях, по крайней мере для подземных горных выработок, ПХГ и месторождений нефти и газа.

Полученные результаты обосновывают третье защищаемое положение: «Оценки точности расчета смещений земной поверхности по данным с одной и двух орбит над подземными хранилищами газа (ПХГ) и калийными рудниками, впервые полученные с применением геомеханических моделей».

Глава 5. Применение дифференциальной интерферометрии и метода офсетов для исследования косейсмических и постсейсмических процессов в области землетрясения в Турции 6.02.2023 г. В результате катастрофического землетрясения в Турции 6.02.2023 г. по линиям существующих крупных разломов произошли в основном сдвиговые смещения. Их величины были оценены методами спутниковой РСА-

интерферометрии. Полученные смещения методом офсетов по дальности и азимуту были использованы для построения модели поверхности разрыва. Постсейсмические смещения исследованы методом DInSAR.

В разделе 5.1 кратко описано тектоническое строение района, в котором произошли катастрофические землетрясения с магнитудами M_w 7.8 и M_w 7.5, а также их многочисленные афтершоки. Эти сейсмические события произошли в пределах тектонически активной зоны, где Африканская и Аравийская плиты, двигаясь в сторону Евразийской плиты, вытесняют Анатолийский блок в западном направлении. Движение блока происходит вдоль двух крупных сдвиговых зон: правосторонней Северо-Анатолийской зоны разлома (цифра 1 на рисунке 8) и левосторонней Восточно-Анатолийской зоны разломов (далее – ВАЗР, цифра 2 на рисунке 8). Граница между Анатолийским блоком и Аравийской плитой проходит по ВАЗР – одной из крупнейших внутриконтинентальных трансформных зон Восточного Средиземноморья.

В разделе 5.2 изложена методика и результаты определения смещений по парным интерферограммам. Смещения оценивались по парам спутниковых снимков Sentinel-1A, выполненных до и после 6 февраля 2023 года, с восходящей и нисходящей орбиты. Наилучший результат был получен при использовании снимков с нисходящей орбиты (азимут 189°) от 29 января и 10 февраля 2023 года. По парным интерферограммам, используя метод DInSAR, смещения определяются в направлении на спутник (U_{LOS}) и включают вертикальную и горизонтальную компоненты вектора смещений. Метод офсетов позволяет рассчитать смещения в направлении азимута и дальности (вдоль и поперек орбиты), а затем – рассчитать модуль вектора горизонтальных смещений и его направление (рисунок 8). Эти величины уже не зависят от геометрии съемки.

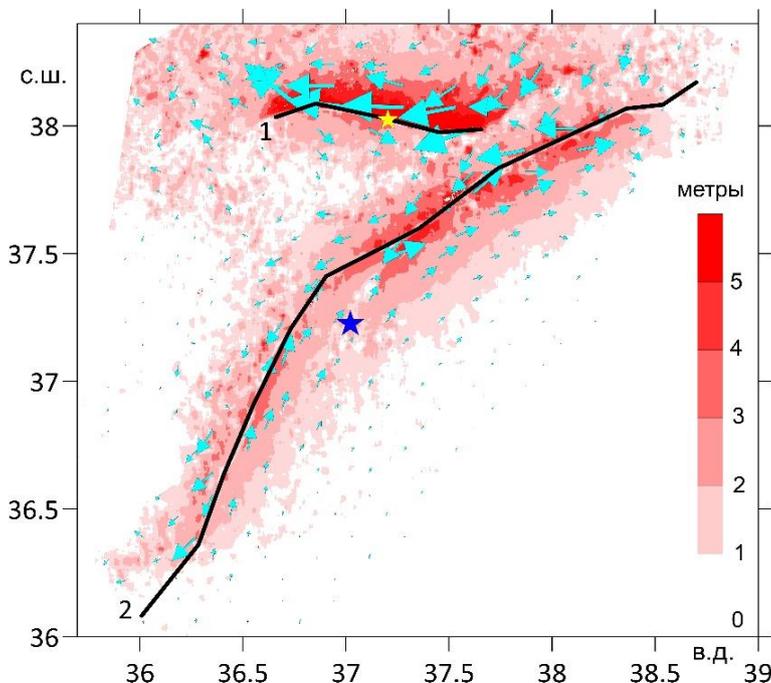


Рисунок 8 – Величины векторов смещений земной поверхности (цветовая шкала, в метрах) и направления горизонтальных смещений (стрелки). Наибольшая стрелка соответствует смещению в 5.22 м. Черные линии проведены вдоль поверхностей разрыва. Звездами показаны эпицентры главных землетрясений, произошедших 6.02.2023 г.

Из рисунка 8 следует, что смещениям более 1 метра подверглась значительная часть Восточной Турции. Максимальные сдвиговые смещения более 5 м произошли на разломе Сюргу-Чардак, а также на центральном и северном участках ВАЗР. Стрелки показывают

направление и величины всех смещений, включая произошедшие в период съемки оползни и обвалы. В целом, стрелки четко показывают сдвиговые смещения в противоположных направлениях на бортах разломов.

В разделе 5.3 приводятся результаты моделирования поверхности сейсмического разрыва. Трасса сейсмических разрывов на дневной поверхности (черные линии на рисунке 8) была построена по данным базы разломов [Бачманов и др., 2017] и линии, которая разграничивает смещения в противоположных направлениях на карте смещений, полученной методом офсетов. Далее эта линия была аппроксимирована отрезками прямых, которые являлись верхней границей прямоугольных площадок, аппроксимирующих сейсмический разрыв. Трасса разлома Сюргу-Чардак была разделена на 4 элемента по простиранию, а ВАЗР – на 15 элементов (рисунок 9), из них 7 элементов расположены вдоль его южного сегмента, а 8 элементов – на центральном и северном сегментах. На разломе Сюргу-Чардак разрыв был задан от глубины 0.5 км до 20 км с падением на север под углом 80° ; на ВАЗР глубина верхней кромки задана равной 1 км, нижней – 20 км, аналогично [Barbot et al., 2023], падение в северо-западном направлении под углом 85° согласно [Basili et al., 2013]. Небольшой разрыв, с которого начались землетрясения, аппроксимирован одним прямоугольным элементом с глубиной верхней кромки 0.5 км, нижней – 15 км, угол падения 85° на восток. Длина разрыва по простиранию, равная 15 км, определена по карте смещений, согласно которой, разрыв не достиг ВАЗР. На рисунке 9 это разлом расположен южнее ВАЗР под профилем 4.

По глубине модель главных разломов разделена на три уровня одинаковой протяженности по падению. Решение найдено под регуляризирующим условием, что смещения близки к чистому сдвигу. Для решения использовано решение задачи о смещениях на поверхности сферической, радиально расслоенной планеты в результате сдвига по падению и простиранию на расположенной на заданной глубине прямоугольной площадке [Pollitz, 1996]. Результат моделирования показан на рисунке 9.

Выводы по главе 5. На основе детального анализа спутниковых радарных снимков были определены горизонтальные смещения и смещения на спутник в окрестностях разломов ВАЗР и Сюргу-Чардак, а также небольшого разлома на продолжении Восточно-Хатайской зоны разломов, на котором началась серия катастрофических землетрясений. Отличием полученной модели от модели USGS является более детальная геометрия поверхности сейсмического разрыва. Важное отличие построенной нами модели от модели [Barbot et al., 2023] в том, что на севере поверхность разрыва землетрясения 6.02.2023 г. перекрывается с областью разрыва землетрясения 24.01.2020 г. (красный прямоугольник в верхнем правом углу на рисунке 9), что указывает на отсутствие пробела между очаговыми областями этих землетрясений. И, действительно, в течение уже более чем полугода сейсмические события здесь не происходили. Напротив, на южном окончании поверхности разрыва в нашей модели обнаружен дефицит смещений в верхней части земной коры. Там произошло землетрясение магнитудой M_w 6.3, поле смещений которого зафиксировано на интерферограмме за следующие 12 дней (с 10 по 22 февраля 2023 г.). Одной из причин расхождений в результатах с моделью [Barbot et al., 2023] может быть различие в методах решения. При расчете модели нами использовано регуляризирующее

условие близости угла подвижки к заданному по решению механизма очага [Михайлов и др., 2019; Diament et al., 2020]. Другие авторы используют условие гладкости получаемого решения. Второй причиной может быть использование нами модели сферической, радиально расслоенной планеты, которая лучше описывает строение верхней оболочки Земли.

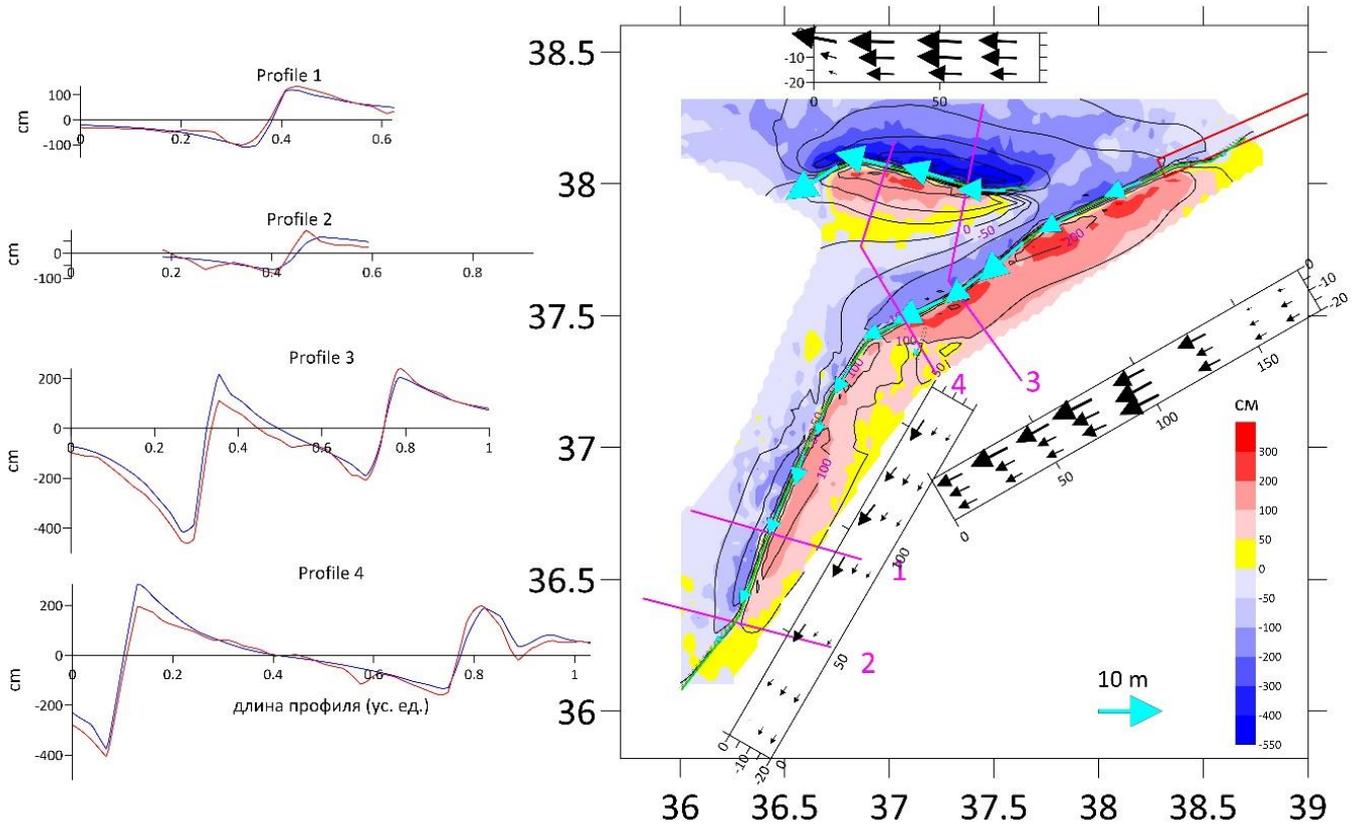


Рисунок 9 – Модель поверхности разрыва землетрясений 6.02.2023 г., построенная по данным РСА-интерферометрии. Цветовая карта – смещения земной поверхности по дальности (в см), определенные методом офсетов по снимкам с нисходящего трека. Черные изолинии – те же смещения, рассчитанные по модели. Черные прямоугольники показывают поверхность разрыва в вертикальном разрезе, со смещениями на трех уровнях – верхнем, среднем и нижнем (черные стрелки). Голубые стрелки вдоль разломов показывают смещения на верхнем уровне модели в том же масштабе. Максимальная длина стрелки составляет 10.2 м, расположена на верхнем уровне центрального сегмента ВАЗР. Бордовые линии – профили через область разрыва. Слева для этих профилей показаны РСА-данные (красный цвет) и подбор по модели (синий цвет). Красный прямоугольник на северо-восточном окончании ВАЗР показывает юго-восточное окончание модели поверхности разрыва землетрясения 24.01.2020 г., построенной Геологической службой США (см. сайт USGS)

Данная глава обосновывает четвертое защищаемое положение: «Новая модель поверхности разрыва землетрясения в Турции, произошедшего 6.02.2023 г. и постсейсмических процессов, полученная на основе методов дифференциальной интерферометрии и метода офсетов».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты диссертационной работы получены с использованием всех основных технологий спутниковой РСА-интерферометрии: метода дифференциальной интерферометрии (DInSAR), многопроходных пар снимков (SBaS, IPTA), офсетов. Эти методы широко используются во всем мире, с их помощью определяются смещения на многих природных и техногенных объектах. Однако для непрерывного мониторинга оседаний над калийными рудниками в городах Березники и Соликамск потребовалась разработка специальной технологии интерферометрической обработки, с применением которой определены оседания земной поверхности на протяжении 2020-2022 годов. С применением методов DInSAR и офсетов проведен анализ смещений в результате катастрофического землетрясения в Турции 6.02.2023 г. Теоретическая часть работы также посвящена оценкам точности определения смещений земной поверхности над ПХГ и калийными рудниками по снимкам с одной и двух орбит. Оценки получены в рамках геомеханических моделей. Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Разработана технология обработки РСА-снимков, включающая два метода *Std* и *Step*, эффективных при наличии обширных некогерентных зон и при невысоком отношении сигнал/шум.

2. С применением этой технологии выполнен мониторинг оседаний над калийными рудниками в г. Березники и г. Соликамск. Анализ карт скоростей оседаний и временных рядов, полученных методами IPTA и SBaS, показал, что за период мониторинга оседания продолжают с постоянной скоростью или замедляются, что говорит об эффективности принимаемых мер по защите подземных горных выработок. Отмечено две области – в начале проспекта Ленина и на берегу Нижнезырянского водохранилища, где за 2020-2022 гг. скорости оседаний возросли на 25 %.

3. Для территории г. Соликамск существенные смещения зафиксированы методом *Std* в области провала. За 2022 год выявлено несколько областей с величиной оседаний около 40 мм/год, на которые рекомендовано обратить внимание.

4. Методами DInSAR и офсетов определены смещения земной поверхности и построена модель поверхности разрыва для катастрофических землетрясений в Турции 06.02.2023 г. В отличие от других моделей, эта модель показывает, что сейсмический разрыв 2023 г. соединился с разрывом землетрясения 2020 г., т.е. между ними не осталось запертого участка, представляющего повышенную сейсмическую опасность.

5. С использованием геомеханических моделей ПХГ и лавы, разрабатываемой столбовым способом, получены оценки точности определения геометрии и величины оседаний земной поверхности по РСА снимкам с одной и двух орбит. Результаты показывают, что расчёт компонент смещений по данным с двух орбит не должен приводить к существенным ошибкам при оценке вертикальной и восточной компоненты вектора смещений в реальных ситуациях. При использовании спутниковых данных с одной орбиты, ошибка определения величины субвертикальных смещений составляет около 8 %, а максимальная область оседаний смещается в сторону спутника на 50-60 м (на запад для съемки с восходящей орбиты спутника и на восток – с нисходящей). Эти смещения необходимо учитывать при работе со снимками с одной орбиты.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **И.П. Бабаянц**, А.А. Барях, М.С. Волкова, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, С.А. Хайретдинов. Мониторинг оседаний на территории г. Березники (Пермский край) методами спутниковой радарной интерферометрии. I. Дифференциальная интерферометрия // Геофизические исследования. – 2021. – Т. 22. – № 4. – С.73–89. – doi.org/10.21455/gr2021.4-5.
2. **И.П. Бабаянц**, А.А. Барях, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, М.С. Волкова, С.А. Хайретдинов. Мониторинг оседаний земной поверхности на территории г. Березники (Пермский край) методами спутниковой радарной интерферометрии: II. Метод устойчивых отражателей // Геофизические исследования. – 2023. – №2. – С. 39–57. – doi.org/10.21455/gr2023.2-3. Перевод статьи на англ. язык: **I.P. Babayants**, A.A. Baryakh, V.O. Mikhailov, E.P. Timoshkina, M.S. Volkova and S.A. Khairtdinov. Monitoring of Subsidence in Berezniki City (Perm Krai) by SAR Interferometry. Method of Persistent Scatterers // Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2023, Vol. 59, No. 6, pp. 1066–1078. DOI: 10.1134/S1069351323060034.
3. **И.П. Бабаянц**, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, С.А. Хайретдинов. О точности расчёта вертикальной и восточной компонент смещения земной поверхности по снимкам спутниковых радаров с синтезированной апертурой с двух орбит // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20. – № 2. – С. 135–144. – DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-135-143.
4. **И.П. Бабаянц**, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, А.А. Барях. Соотношение амплитуды и геометрии мульды сдвижения, определяемых по спутниковым радарным снимкам с одной или двух орбит // Геофизические исследования. – 2023. – № 4. – С. 28–42. – <https://doi.org/10.21455/gr2023.4-2>.
5. В.О. Михайлов, **И.П. Бабаянц**, М.С. Волкова, Е.П. Тимошкина, В.Б. Смирнов, С.А. Тихоцкий. Землетрясения в Турции 06.02.2023: Модель поверхности разрыва по данным спутниковой радарной интерферометрии // Доклады РАН, сер. Науки о Земле. – 2023. – Т. 511. – № 1. – С. 71–77.
6. В.О. Михайлов, **И.П. Бабаянц**, М.С. Волкова, Е.П. Тимошкина, В.Б. Смирнов, С.А. Тихоцкий. Реконструкция косейсмических и постсейсмических процессов для землетрясения в Турции 06.02.2023 по данным радарной спутниковой интерферометрии // Физика Земли. – 2023. – № 6. – С. 77-88.

Публикации в сборниках и материалах конференций:

1. М.С. Волкова, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро, **И.П. Бабаянц**, П.Н. Дмитриев, С.А. Хайретдинов. Опыт применения спутниковой радарной интерферометрии для изучения вулканических процессов на Камчатке // Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции с международным участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 16–20 ноября. – М., ИКИ РАН, 2020. – С. 74. – DOI 10.21046/18DZZconf-2020a.
2. **И.П. Бабаянц**, А.А. Барях, М.С. Волкова, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, С.А. Хайретдинов. Мониторинг оседаний на территории г. Березники (Пермский край) методами спутниковой радарной интерферометрии // Материалы 19-й Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 15 – 19 ноября 2021 г. – М., ИКИ РАН. – С. 74. – DOI 10.21046/19DZZconf-2021a.
3. **И.П. Бабаянц**, А.А. Барях, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, М.С. Волкова, С.А. Хайретдинов. Мониторинг оседаний земной поверхности на территории г. Березники (Пермский край) методами спутниковой радарной интерферометрии // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. – М., ИКИ РАН, 2022. – С. 256. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a.
4. **И.П. Бабаянц**, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, С.А. Хайретдинов. Оценка точности расчета вертикальной и восточной компонент вектора смещений земной поверхности по радарным снимкам с двух треков на модели подземного хранилища газа // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции – М., ИКИ РАН, 2022. – С. 257. – DOI 10.21046/20DZZconf-2022a.
5. V. Mikhailov, M. Volkova, V. Timofeeva, N. Shapiro, E. Timoshkina, S. Senyukov, P. Dmitriev, **I. Babayants**. SAR Monitoring of Seismic and Volcanic Events in the Kamchatka Peninsula // FRINGE 2021, Online, Netherlands, 31 May - 4 June of 2021.
6. V. Mikhailov, M. Volkova, E. Timoshkina, N. Shapiro, V. Smirnov, P. Dmitriev, **I. Babayantz**. Subsidence of the lava flow formed during 2012-2013 Tolbachik fissure eruption: SAR data and thermal model // European Geosciences Union General Assembly, 2021, Vienna, Austria, 19-30 April of 2021.
7. В.О. Михайлов, **И.П. Бабаянц**, М.С. Волкова, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина. Поле смещений земной поверхности и модель поверхностей разрывов землетрясений в Турции 06 февраля 2023 г. по данным спутниковой радарной интерферометрии // Научная конференция Ломоносовские чтения. Секция физики. Апрель 2023 года. Сборник тезисов докладов. С. 210-212.

Подписано в печать 6 декабря 2023 г.
Формат 64×84/16. Объем 1,5 усл. печ. л.
Тираж 100 шт. Заказ №__
Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1
Тел./факс: (499) 254 90 88