

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ ИМЕНИ О.Ю. ШМИДТА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИФЗ РАН)**

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор Михайлов В.О.

Москва – 2023

Оглавление

	Стр.
Введение.....	4
1 Основные проблемы оценки полей смещений по данным спутниковой радарной интерферометрии и их интерпретации.....	13
1.1 Краткое описание методов дифференциальной РСА-интерферометрии.....	13
1.2 Методы многопроходных интерферометрических пар снимков.....	22
1.2.1 Метод малых базовых линий.....	22
1.2.2 Методы устойчивых отражателей.....	23
1.2.3 Метод ИРТА – интерферометрический анализ точечных целей.....	24
1.3 Метод офсетов.....	27
Выводы по главе 1.....	29
2 Технология оценки оседаний на подработанных территориях в г. Березники и г. Соликамск.....	31
2.1 Постановка задачи.....	31
2.2 Технология спутникового мониторинга оседаний земной поверхности в условиях Пермского края.....	33
Выводы по главе 2.....	38
3 Результаты мониторинга движений на подрабатываемых территориях гг. Березники и Соликамск на основе разработанных технологий и метода анализа временных рядов оседаний.....	39
3.1 Выбор технологии мониторинга для подработанной территории г. Березники	39
3.2 Оценка оседаний на подработанных территориях в районе г. Березники.....	44
3.3 Анализ полей смещений методом устойчивых отражателей.....	58
3.4 Площадной мониторинг оседаний земной поверхности в пределах подработанной территории г. Соликамск (рудник СКРУ-2)	63
3.5 Методика анализа временных рядов оседаний на подрабатываемой территории г. Березники.....	69
Выводы по главе 3.....	75
4. Оценки точности определения смещений земной поверхности над подземными хранилищами газа и калийными рудниками по спутниковым снимкам с одной и двух орбит с применением геомеханических моделей.....	77
4.1 Оценка точности расчёта смещений земной поверхности по спутниковым снимкам с одной и двух орбит с использованием модели подземного хранилища газа.....	77

	Стр.
4.1.1 Постановка задачи.....	77
4.1.2 Модель смещений земной поверхности для подземного хранилища газа (ПХГ)	78
4.1.3 Оценка точности расчёта смещений земной поверхности по спутниковым снимкам с одной и двух орбит.....	81
4.1.4 Выводы по разделу 4.1.....	84
4.2 Оценки точности определения смещений земной поверхности над калийными рудниками по спутниковым снимкам с одной и двух орбит с применением геомеханической модели.....	85
4.2.1 Постановка задачи.....	85
4.2.2 Модель оседаний земной поверхности над горными выработками, разрабатываемыми столбовой системой.....	86
4.2.3 Расчет теоретических смещений над горной выработкой по данным с одной или двух орбит.....	89
4.2.4 Оценка погрешности определения смещений по данным с двух орбит....	92
4.2.5 Оценка погрешности определения смещений по данным с одной орбиты	93
4.2.6 Выводы по разделу 4.2.....	96
4.3 Выводы по главе 4.....	97
5. Применение дифференциальной интерферометрии и метода офсетов для исследования косейсмических и постсейсмических процессов в области землетрясения в Турции 6.02.2023 г.	98
5.1 Постановка задачи.....	98
5.2 Поля смещений по парным интерферограммам с двух орбит.....	101
5.2.1 Поля смещений, полученные методом офсетов с двух орбит.....	102
5.2.2 Поля смещений, полученные методом DInSAR с двух орбит.....	105
5.3 Моделирование поверхности сейсмического разрыва.....	107
5.4 Выводы по главе 5.....	111
Заключение.....	114
Список сокращений и условных обозначений.....	116
Список литературы.....	118

Введение

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 [40, 68, 83] и строить с их использованием численные модели природных и техногенных процессов. В то же 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 (ИРТА) и малых базовых линий SBaS; при исследовании землетрясений в Турции – метод офсетов. Численное решение задач о величинах смещений над подземной горной выработкой получено на основании использования классической (инженерной) модели оседаний земной поверхности [32]. Для расчета компонент смещений над ПХГ модифицировано известное решение задачи теории упругости [56].

Дифференциальная интерферометрия основана на анализе разности фаз отраженных сигналов от каждой наземной отражающей площадки, полученных при последовательной съемке двух РСА-снимков. Если за период между РСА-съемками происходит смещение отражающей площадки, то разность фазовых компонент двух снимков будет включать в себя компоненту, связанную с произошедшими смещениями.

Методы точечных отражателей расширяют возможности методов DInSAR – благодаря использованию серии РСА-снимков. Наличие серии спутниковых снимков позволяет: 1) рассчитывать вклад атмосферной компоненты и удалять его из дифференциальной интерферограммы; 2) итеративно улучшать расчеты путем введения коррекции к ЦМР, величины базовых линий, атмосферной фазы, что позволяет уточнять оценки скорости деформаций и расширять список точек-кандидатов в устойчивые отражатели; 3) строить временные ряды смещений для каждого устойчивого отражателя. Устойчивыми отражателями считаются объекты, демонстрирующие стабильность амплитуды и/или фазы отраженного сигнала в смысле принятого статистического критерия, во всей серии РСА-снимков. Это позволяет определять медленные процессы деформирования земной поверхности, которые не отражаются на парных интерферограммах, полученных методом DInSAR.

В общем случае, полученные смещения рассчитываются в направлении на спутник, т.е. являются суммой смещений на север, восток и по вертикали, умноженных на синусы и косинусы угла наклона зондирующего луча и азимута полета спутника [59]. Хотя эти углы известны для каждой отражающей площадки, определить три компоненты вектора смещений по смещениям на спутник, полученным с одной или двух орбит, невозможно. Необходимы дополнительные предположения или привлечение геодинимических моделей исследуемых процессов, в частности, сейсмического разрыва или модели оседаний над горными выработками и ПХГ, примененных в данной диссертационной работе (главы 4, 5).

Метод офсетов основан на оценке функции кросс-корреляции двух корегистрированных (т.е. совмещенных) снимков. Положение максимума двумерной функции кросс-корреляции определяет офсет (смещение) вдоль и поперек орбиты (по азимуту и дальности) в координатах снимка. Далее необходимо ввести поправку за геометрию съемки, поскольку полученные офсеты определяются не только смещением поверхности за время между съемками, но и орбитальной компонентой офсетов, определяемой расстоянием между точками съемки, и углом между направлением полета спутника в момент съемки первого и второго снимков.

Полученные смещения в пикселях (в координатах снимка) переводят в метры и геокодируют 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 г. 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 [77]. Решение получено под регуляризирующим условием близости направления смещений к чистому сдвигу.

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 восходящей и нисходящей 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 [Varbot 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.

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):

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

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.:

1. Волкова, М.С. Опыт применения спутниковой радарной интерферометрии для изучения вулканических процессов на Камчатке / М.С. Волкова, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро, И.П. Бабаянц, П.Н. Дмитриев, С.А. Хайретдинов // 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. Бабаянц, И.П. Мониторинг оседаний на территории г. Березники (Пермский край) методами спутниковой радарной интерферометрии / И.П. Бабаянц, А.А. Барях, М.С. Волкова, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, С.А. Хайретдинов // 19-я 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. Бабаянц, И.П. Мониторинг оседаний земной поверхности на территории г. Березники (Пермский край) методами спутниковой радарной интерферометрии / И.П. Бабаянц, А.А. Барях, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, М.С. Волкова, С.А. Хайретдинов // 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. Бабаянц, И.П. Оценка точности расчета вертикальной и восточной компонент вектора смещений земной поверхности по радарным снимкам с двух треков на модели подземного хранилища газа. / И.П. Бабаянц, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, С.А. Хайретдинов // 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. Mikhailov, V. SAR Monitoring of Seismic and Volcanic Events in the Kamchatka Peninsula / V. Mikhailov, M. Volkova, V. Timofeeva, N. Shapiro, E. Timoshkina, S. Senyukov, P. Dmitriev, I. Babayants // FRINGE 2021, Online, Netherlands, 31 May - 4 June of 2021.

6. Mikhailov, V. Subsidence of the lava flow formed during 2012-2013 Tolbachik fissure eruption: SAR data and thermal model / V. Mikhailov, M. Volkova, E. Timoshkina, N. Shapiro, V. Smirnov, P. Dmitriev, I. Babayantz // European Geosciences Union General Assembly, 2021, Vienna, Austria, 19-30 April of 2021.
7. Михайлов, В.О. Поле смещений земной поверхности и модель поверхностей разрывов землетрясений в Турции 06 февраля 2023 г. по данным спутниковой радарной интерферометрии / В.О. Михайлов, И.П. Бабаянц, М.С. Волкова, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина // Научная конференция Ломоносовские чтения. Секция физики. Апрель 2023 года. Сборник тезисов докладов. С. 210-212.

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: к.ф.-м.н. М.С. Волковой, к.ф.-м.н. Е.П. Тимошкиной, д.ф.-м.н., профессору 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 спутника Sentinel-1A/B, Немецкому центру авиации и космонавтики (DLR) за снимки со спутников TerraSAR-X/TanDEM-X, и группе швейцарских коллег – разработчиков программного комплекса GAMMA Software.

1 Основные проблемы оценки полей смещений по данным спутниковой радарной интерферометрии и их интерпретации

1.1 Краткое описание методов дифференциальной РСА-интерферометрии

Спутниковая интерферометрия, выполняемая радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА), является активным методом дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [55, 60, 68, 69 и др.]. Радиолокационная антенна бокового обзора излучает электромагнитный сигнал под некоторым углом к вертикали, и принимает отраженный сигнал от объектов, находящихся на земной поверхности. Технология синтеза апертуры радиолокатора (в английской литературе – *InSAR, Interferometric Synthetic Aperture Radar*, Радиолокатор с синтезированной апертурой, далее РСА), позволяет существенно увеличить разрешающую способность антенны и повысить соотношение сигнал-помеха в отраженном сигнале при относительно небольших горизонтальных размерах антенны космических аппаратов. Диапазон излучаемых частот наиболее распространенных спутниковых радиолокационных систем находится в сантиметровом диапазоне и подразделяется на L ($\lambda = 30-15$ см), S ($\lambda = 15-7.5$ см), C ($\lambda = 7.5-3.75$ см) и X ($\lambda = 3.75-2.5$ см) – диапазоны, что находится в интервале частот 1-12 ГГц. Выбор рабочей частоты спутника определяет его пространственное разрешение (т.е. минимальное расстояние между отражающими объектами на земной поверхности, при котором они становятся различимыми на радарном снимке) и устойчивость к возмущающим атмосферным явлениям [46, 48]. Например, процессы рассеяния и поглощения излучения в тропосфере оказывают влияние тем больше, чем короче длина волны радиолокатора. В тоже время, амплитуда ионосферных помех прямо пропорциональна длине волны излучения и сильнее влияет на снимки L – диапазона. Также, для коротковолнового излучения помехой является даже небольшой растительный или снежный покров, но при этом достигается высокое пространственное разрешение. Преимущество длинноволнового (L-диапазона) радиолокатора заключается в меньшей чувствительности к тропосферным помехам, снимки на протяжении нескольких лет сохраняют когерентность. Длинноволновое излучение проникает через растительный покров и снег небольшой мощности. Недостатком является более низкое пространственное разрешение (размер пикселя спутника JERS-1, работавшего в 90-е годы прошлого века, на частоте 1.3 ГГц, составлял порядка 18 метров), по сравнению с размерами пикселей радиолокаторов, работающих в X и C – диапазонах.

В данной работе используются снимки C-диапазона спутников Sentinel-1A (1B), и снимки X-диапазона спутника TerraSAR-X и его тандемной пары – спутника TanDEM-X. Краткие технические характеристики спутников приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Краткие технические характеристики спутников Sentinel и TerraSAR-X

	Sentinel-1A, Sentinel-1B	TerraSAR-X, TanDEM-X
Диапазон частот, ГГц	5.4 (С-диапазон)	9.65 (Х-диапазон)
Длина волны, см	5.55	3.1
Площадь съемки, км	150 × 250	30 × 50
Период обращения, дней	12	11
Размер пикселя по дальности и азимуту в радарных координатах, м	2.33 × 13.86	0.91 × 1.9
Размер пикселя по дальности и азимуту в наземных координатах в режиме съемки*, м	5 × 20 *IW	3 × 3 *StripMap

Основной принцип радиолокационных измерений проиллюстрирован на рисунке 1.1. Космический аппарат движется по круговой орбите. Из-за вращения Земли, спутник относительно наблюдателя на ее поверхности может двигаться с юга на север (т.н. восходящая орбита) и с севера на юг (т.н. нисходящая орбита). Орбиты околополярные, солнечно-синхронные, их высоты составляют 500-800 км. Излучающе-принимающая антенна, как правило, ориентирована вправо от траектории движения спутника. Направление обзора характеризуется углом видения (англ. *incidence angle* – угол падения) между вертикалью и т.н. направлением видения (англ. *LOS, Line-Of-Sight*), и в разных радиолокационных системах варьируется в пределах 30-50 градусов. Ширина получаемого изображения составляет десятки, в некоторых режимах съемки – сотни километров, а длина вдоль направления полета – 50-100 и более километров.

Полученный в результате съемки радиолокационный снимок представляет собой двумерную матрицу комплексных чисел, который характеризует амплитудную и фазовую составляющую радиолокационного сигнала, отраженного от каждого элемента (пикселя) земной поверхности. Фазовая компонента равна разности фаз сигнала, излученного антенной, и принятого сигнала, отраженного от земной поверхности. Координаты пикселей в радарных координатах характеризуются расстоянием вдоль траектории спутника, т.н. азимутом, а поперек траектории – т.н. наклонной дальностью (рисунок 1.1). Следует уточнить, что размер пикселя по дальности и азимуту – это размеры пространственной сетки, на которую рассчитывают значения амплитуды и фазы. Размер пикселя выбирается близким к величине разрешения, определяемой параметрами антенны и сжатием по дальности, синтезированием апертуры по азимуту.

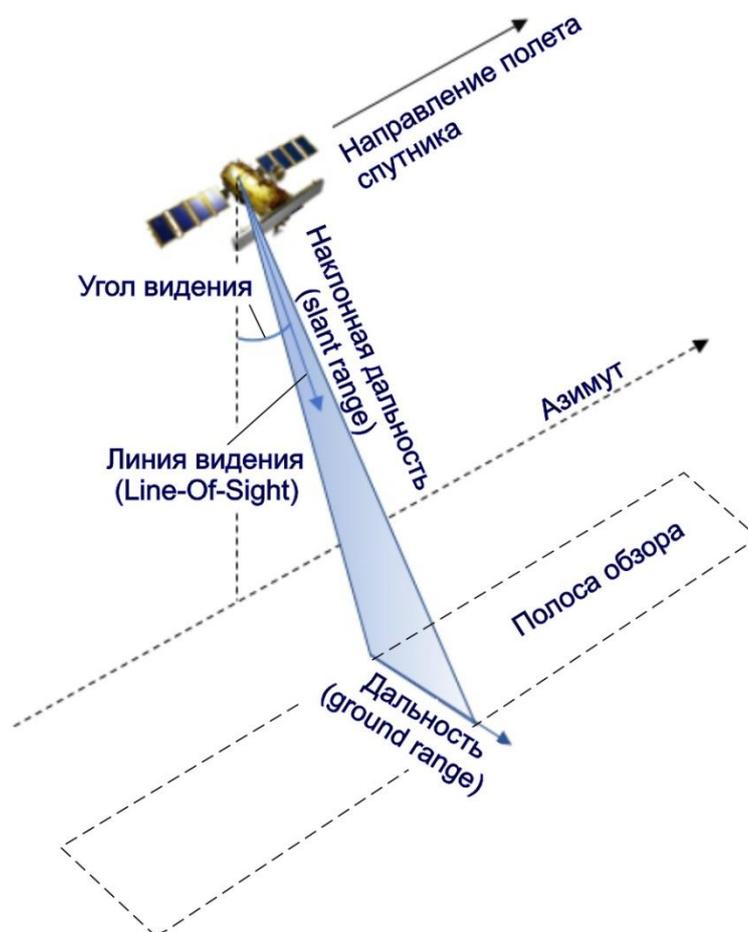


Рисунок 1.1 – Схема измерений радиолокатора с синтезированной апертурой

Анализ двух спутниковых снимков, выполненных с близких орбит одним и тем же космическим аппаратом или его тандемной парой, позволяет рассчитывать цифровые модели рельефа (ЦМР) и оценивать величины смещений отражающих объектов за интервал времени между съемками (рисунок 1.2). Для этого, после процедуры корегистрации (совмещения) двух снимков, комплексную матрицу первого снимка умножают на комплексно сопряженную матрицу второго снимка, и получают разность фаз для каждого пикселя этой пары снимков, это является основой метода *DInSAR*, или дифференциальной интерферометрии [59]. Разность фаз содержит пять компонент:

$$\Delta\varphi = W\left[\frac{4\pi(r_{1G}-r_{2G})}{\lambda} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{orb}} + \varphi_{\theta} + \varphi_{\text{noise}}\right], \quad (1.1)$$

где r_{1G} и r_{2G} – расстояния, пройденные от каждого спутника до одной и той же отражающей площадки, λ – длина волны радиолокатора, φ_{atm} – фазовый сдвиг за счет различия условий распространения электромагнитных волн в атмосфере в моменты съёмки первого и второго снимка; φ_{orb} – фазовый сдвиг за счет неточного знания орбиты спутников; φ_{θ} – фазовый сдвиг за счет ошибок в используемой ЦМР, которые приводят к ошибке в определении угла видения спутника; φ_n – вклад различных, в том числе аппаратурных, шумов и неучтенных ошибок.. $W[...]$

– оператор свертки по модулю 2π . Иными словами, абсолютная фаза (первый член в квадратных скобках) – это разность длин пробега сигнала от спутника до отражающей площадки при первой и второй съемке, деленной на длину волны радиолокатора, и умноженной на 4π (этим учитывается двойной пробег – до цели и обратно), плюс различного рода помехи. Полное число периодов, содержащееся в абсолютной фазе, не отражается в фазе $\Delta\varphi$ дифференциальной интерферограммы. Фаза $\Delta\varphi$ равна абсолютной фазе, свернутой по модулю 2π .

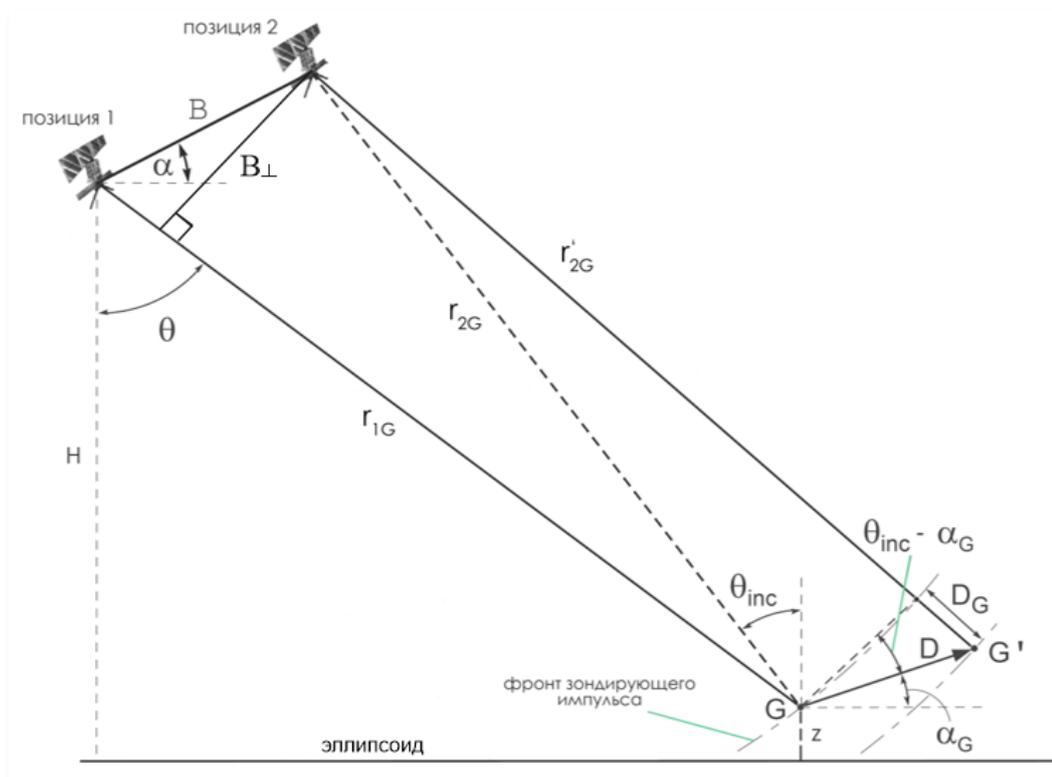


Рисунок 1.2 – Геометрия съемки при наличии смещений отражающей площадки. r_{1G} и r_{2G} – расстояние от спутника до отражающей площадки при первой и второй съемке соответственно при отсутствии смещений; r'_{2G} – расстояние от спутника до отражающей площадки после ее смещения на расстояние D ; z – высота отражающей площадки над эллипсоидом; θ – угол наклона зондирующего луча; θ_{inc} – локальный угол падения (отсчитывается от нормали к эллипсоиду); B – базовая линия; B_{\perp} – перпендикулярная базовая линия; D_G – проекция вектора G на линию видения спутника.

Разность длин пробега r_{1G} и r_{2G} складывается из трех компонент. Первая определяется расстоянием между точками первой и второй съемки, т.е. базовой линией B ; вторая – рельефом местности (z), третья – смещением отражающей площадки в направлении на спутник – D_G (рисунок 1.2). Чувствительность фазового сдвига к топографии на три порядка ниже, чем к смещениям земной поверхности. Вклад топографии зависит от величины перпендикулярной базовой линии – полному циклу 2π в С-диапазоне соответствует перепад высот рельефа в 300 м.

Смещения, равные половине длины волны (28 мм в С-диапазоне), также создают фазовое смещение в 2π [53]. Это позволяет строить цифровые модели рельефа (ЦМР) при отсутствии существенных смещений земной поверхности¹ [94]. Поскольку достаточно детальные ЦМР уже построены и величина базовой линии известна, влияние этих компонент исключают и получают т.н. дифференциальную интерферограмму. Вычисленная таким образом интерферограмма называется дифференциальной (*DInSAR*), ее разность фаз (фазовый сдвиг) складывается из суммы пяти компонент:

$$\Delta\varphi = W[\varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{orb}} + \varphi_{\theta} + \varphi_n], \quad (1.2)$$

где φ_{def} – фазовый сдвиг за счет смещения отражающей поверхности в направлении на спутник D_G .

Из перечисленных пяти фазовых компонент, входящих в суммарное поле смещений, четыре по сути являются помехами при расчетах деформаций земной поверхности. Цель дифференциальной интерферометрии заключается в выделении «чистой» фазы φ_{def} , отвечающей деформациям земной поверхности во времени. Так возникает задача определения наилучшей стратегии обработки, которая позволит минимизировать влияние помех с учетом конкретных условий исследуемого района и происходящих там смещений земной поверхности.

Отметим, что каждая из перечисленных помех проявляется в фазовом поле неодинаково, что позволяет последовательно выделить их составляющие и учесть их в итоговой интерферограмме. Ионосферные помехи проявляются в виде длиннопериодного, часто линейного тренда, в этом случае они могут быть легко идентифицированы и устранены [82]. Атмосферные колебания температуры, влажности и плотности воздуха приводят к развитию турбулентности, которая проявляется на интерферограмме как «пятна» разной величины и интенсивности [53]. Их можно ошибочно идентифицировать как локальные оседания земной поверхности, поэтому учет атмосферных явлений крайне важен при оценке медленных локальных деформаций.

Для оценки полей смещений земной поверхности методами РСА-интерферометрии, независимо от применяемых подходов, необходима обработка пары космических снимков, выполненных в разные даты с близких точек одной и той же орбиты. В общем случае интерферометрическая обработка пары снимков состоит из следующих основных этапов, каждый из которых включает целый ряд отдельных шагов:

- Совмещение (коррегистрация) основного (*master*) и вспомогательного (*slave*) снимков. Предварительно рекомендуется провести интерполирование (англ. *oversampling*)

¹ ЦМР SRTM была построена по снимкам, выполненным одновременно двумя антеннами, установленными на космическом аппарате Шаттл, поэтому деформационная компонента была полностью исключена.

снимка по дальности и дерампинг – приведение к нулевой Доплеровской частоте (англ. *zero Doppler*).

- Генерация комплексной интерферограммы.
- Коррекция комплексной интерферограммы: поправки за ЦМР, перпендикулярную базовую линию и кривизну Земли, получение дифференциальной интерферограммы.
- Фильтрация дифференциальной интерферограммы для устранения атмосферных помех и термических шумов аппаратуры. При этом используются разные подходы к выбору необходимой фильтрации, которые изложены ниже.
- Расчет карты когерентности двух спутниковых изображений.
- Развертка свернутой фазы и перевод ее в абсолютную фазу с устранением разрыва фазы. Фаза отраженного сигнала меняется от $-\pi$ до π и является сверткой абсолютной фазы по модулю 2π . Развертка заключается в прибавлении нужного числа полных периодов $-2k\pi$.
- Перевод абсолютной фазы в смещения земной поверхности.

Корегистрация (совмещение) двух снимков выполняется путем нахождения сходных участков на изображениях. Спутниковые снимки совмещаются путем поиска аффинных преобразований (смещения, растяжения–сжатия координат), которые надо применить к отдельным участкам для их наилучшего совмещения. Здесь также возникает задача пересчета второго снимка на сетку первого снимка в радарных координатах.

Показателем устойчивости отражения радарного сигнала, полученного по двум снимкам, является когерентность, которая рассчитывается по следующей формуле [54, 75]:

$$\gamma_j = \frac{|E(z_1 \cdot z_2^*)|}{\sqrt{E(z_1 \cdot z_1^*) \cdot E(z_2 \cdot z_2^*)}}, \quad (1.3)$$

где $E(\)$ оператор усреднения по пространственной области заданного размера, Z_1, Z_2 – комплексные сигналы, соответствующие одной и той же отражающей площадке (пикселю) на поверхности Земли на двух снимках, формирующих дифференциальную интерферограмму, $*$ – оператор комплексного сопряжения. Карта когерентности представляет собой матрицу, каждый элемент которой равен значению когерентности, соответствующей области осреднения с центром в данной площадке на поверхности Земли (пиксель дифференциальной интерферограммы). Когерентность принимает значения от 0 (некогерентная область) до 1 (когерентная область) и отражает уровень декорреляции двух изображений. Главными источниками декорреляции являются: низкое соотношение сигнал/шум, атмосферные помехи, снег, растительность и т.д. [95] Влияние помех возрастает с увеличением временного интервала между снимками, поэтому связанные с ними расхождения принято называть временной декорреляцией. Кроме того, корреляция ухудшается с увеличением расстояния между точками

орбиты, с которых выполнены два снимка (перпендикулярная базовая линия, рисунок 1.1). Это порождает так называемую пространственную (геометрическую) декорреляцию. Она связана с тем, что при изменении геометрии съемки, т.е. положения спутника при выполнении первого и второго снимка, меняется угол наклона зондирующего луча, что, в свою очередь, приводит к изменению отражательной способности наземных объектов в пределах пикселей. Высокая когерентность означает стабильные, не подверженные изменениям во времени области (крыши зданий, дороги, выходы горных пород, территории без растительности и т.д.), низкая и практически нулевая когерентность характерна для областей с густой растительностью (леса, поля) и водных поверхностей. При обработке снимков порог когерентности выбирается в пределах 0.2-0.3. Области с когерентностью ниже выбранного порога в дальнейших расчетах, как правило, не используются.

Радиолокатор посылает периодические импульсы и регистрирует отраженные сигналы в геометрии наклонной дальности, т.е. в спутниковых координатах (рисунок 1.1), которые необходимо затем преобразовать в наземные координаты. Это преобразование не вызывает трудностей на относительно плоских территориях. Поскольку наклон зондирующего луча составляет 30-50 градусов, в условиях горного рельефа или высотной застройки городов могут возникать эффекты ракурса (англ. *foreshortening*), наложения (англ. *layover*) и затенения (англ. *shadow*). Эффект ракурса заключается в том, что заданному размеру пикселя по наклонной дальности на обращенном к радару склоне горы соответствует площадка большой длины, отражение от которой делает пиксель ярким. На противоположном склоне размеры отражающей площадки, соответствующей тому же размеру пикселя по наклонной дальности, существенно меньше и пиксели на противоположном склоне оказываются более темными. Эффект наложения состоит в том, что луч радиолокатора достигает вершины горы или крыши здания раньше, чем достигнет подножья горы или основания здания. Это приводит к уменьшению длины пробега волны и возникает ложный эффект наклона объекта в сторону радиолокатора. Теневой эффект проявляется как область отсутствия отраженного сигнала на противоположном склоне горы, если угол наклона рельефа больше угла наклона зондирующего луча. Эффекты ракурса и наложения уменьшаются при увеличении угла видения радара, а затенения – увеличивается. Современные пакеты обработки спутниковых данных позволяют, на основании используемой ЦМР и параметров съемки снимка, построить карты наложения и затенения с целью определения зон, в которых интерферометрическая обработка затруднена или невозможна. Области отсутствующих данных можно восполнить, проводя совместную обработку снимков, полученных с восходящей и нисходящей орбит.

Одним из главных способов подавления помех – в основном короткопериодного спекл-шума (англ. *speckle noise*) в низкокогерентных областях, является некогерентное осреднение

пикселей по азимуту и дальности (т.е. вдоль и поперек орбиты спутника), называемое мультилукингом (англ. *multilooking*). При выборе размеров мультилукинга учитываются особенности области съемки – наличие и расположение высоко- и низкокогерентных объектов, размеры пикселя до и после мультилукинга, а также линейные размеры областей, в которых ожидаются смещения (региональные или локальные), и т.д.

Важным этапом в обработке снимков является развертка фазы (англ. *phase unwrapping*). Как уже отмечалось, фаза принимаемого спутником отраженного сигнала свернута по модулю 2π . Для получения истинной фазы, равной удвоенной величине смещений в направлении на спутник деленной на длину волны радарного сигнала, необходимо выполнить операцию развертки фазы, которая сводится к добавлению к свернутой фазе целого числа периодов. Операция развертки в общем случае является неоднозначной, поэтому она выполняется под условием, что смещения в соседних пикселях отличаются не более чем на половину длины волны радарного излучения. Эта операция выполняется с помощью различных стандартных процедур, из которых наиболее часто используются процедуры «MCF» (англ. *Minimum cost flow*) и «Branch cut» [57, 58, 66, 78, 86]. При хорошей когерентности снимков и отсутствии больших смещений за период съемки, выполнение развертки не вызывает больших проблем. В областях с низкой когерентностью (обычно это области с низкой отражательной способностью или области, где отражения неустойчивы, такие как лесные массивы, болота, водные поверхности, пахотные поля, а также области, с большими градиентами смещения), развертка может выполняться с ошибками. Это, в частности, может проявляться в большой величине полученных смещений, в резком изменении ее знака по площади, возникновении регионального наклона в поле смещений.

Как было показано выше, разность фаз двух снимков несет в себе информацию о произошедших смещениях земной поверхности за период между съемками этой пары изображений. Методом суммирования развернутых интерферограмм можно отделить полезный сигнал от случайных шумов [76, 91, 92]. На этом принципе основан метод Stacked InSAR. Этот метод позволяет также ограниченно устранить атмосферные задержки прохождения сигнала радиолокатора [96, 97]. Пример применения данного метода к 437-ми снимкам спутника Sentinel-1, охватывающих 5-летний период, показан в [14]. На основе обработки серии снимков построены поля скоростей смещения блоково-разломной структуры и выявлены основные геодинамические процессы в районе Восточно-Анатолийского разлома.

После проведения процедуры развертки и восстановления истинной фазы, можно рассчитать величину смещений земной поверхности за период между съемками двух радиолокационных снимков. В результате определяются смещения отражающего объекта вдоль направления зондирующего луча, т.е. оценивается проекция вектора смещений в направлении на спутник (*LOS*). Обозначим компоненты вектора смещений на восток, север и по вертикали как

U_E , U_N , и U_Z соответственно (ось Oz направлена вверх), θ – угол наклона зондирующего луча к вертикали, β – азимут орбиты, который отсчитывается от направления на север по часовой стрелке. Тогда смещение в направлении на спутник будет равно [59]:

$$U_{LOS} = U_Z \cos \theta + \sin \theta \cdot (U_N \sin \beta - U_E \cos \beta) \quad (1.4)$$

Рассмотрим вклад каждой компоненты вектора смещений для спутников TerraSAR-X и Sentinel-1. Для нисходящей орбиты спутника TerraSAR-X: $\beta = 187.44^\circ$, средний угол наклона зондирующего луча $\theta = 35.4^\circ$, следовательно:

$$U_{LOS} = 0.815 \cdot U_Z - 0.075 \cdot U_N + 0.574 \cdot U_E. \quad (1.5)$$

Для спутника Sentinel-1: $\beta = 188.18^\circ$ и $\theta = 38.77^\circ$, откуда получаем:

$$U_{LOS} = 0.780 \cdot U_Z - 0.09 \cdot U_N + 0.620 \cdot U_E. \quad (1.6)$$

Очевидно, что, имея одно уравнение, определить три компоненты вектора смещений по известным смещениям U_{LOS} невозможно. Если имеются снимки одного и того же участка поверхности с нисходящей и восходящей орбиты, выполненные одним спутником или его тандемной парой (например, Sentinel-1 А и В), то возникает два уравнения с тремя неизвестными. Они также не имеют единственного решения, но поскольку смещения на север входят в уравнения (1.5) – (1.6) с небольшим весом, то при наличии данных с двух треков, северными смещениями часто пренебрегают и определяют смещения по вертикали и на восток. Имеются технологии восстановления трех компонент вектора смещений на основе численной модели исследуемого процесса (описание методики решения для областей землетрясений, оползневых склонов, вулканов, нефтегазовых месторождений можно найти в работах [5, 22, 27, 85], а также в главах 4-5 этой диссертационной работы).

В случае наличия информации, например, о преобладании вертикальных смещений над горизонтальными, можно рассчитать т.н. «субвертикальные» смещения, которые будут равны смещениям в направлении на спутник, деленным на косинус угла зондирующего луча:

$$U_Z = U_{LOS} / \cos(\theta) \quad (1.7)$$

1.2 Методы многопроходных интерферометрических пар снимков

1.2.1 Метод малых базовых линий

Основной проблемой, возникающей при интерферометрической обработке с целью получения деформаций земной поверхности, является наличие фазовых шумов, связанных с задержками прохождения луча радиолокатора через ионосферу и тропосферу, температурный дрейф, собственные шумы аппаратуры и т.д. По одной паре снимков провести необходимые коррекции для выделения фазы, отвечающей деформациям земной поверхности, удается не всегда. Помимо этого, можно указать на сложность анализа изменений скорости деформаций во времени (временные серии деформаций, англ. *deformation time series*) и трудоемкость расчета всех возможных пар снимков с учетом пространственной и временной декорреляций. Поэтому для решения поставленных задач были разработаны различные методы, в том числе метод «малых базовых линий», метод устойчивых отражателей (PSInSAR) и «точечных целей» (IPTA), речь о которых пойдет ниже. Отметим, что существуют как открытые (SNAP, GMTSAR), так и коммерческие (SARscape, GAMMA Software) программные продукты для обработки спутниковых данных, и их функционал значительно различается.

Суть методики малых базовых линий (англ. *SbAS, Small Baseline Subset*), [38, 65], основная блок-схема которой показана на рисунке 1.3, заключается в следующем. По серии радиолокационных снимков исследуемой территории (рекомендуется иметь не менее 12-15 снимков) выбираются все возможные пары с установленным ограничением на перпендикулярную и временную базовые линии. Это позволяет уменьшить влияние пространственной и временной декорреляций. По выбранным парам снимков вычисляются интерферограммы, которые далее подвергаются выравниванию и фильтрации для удаления высокочастотной составляющей; так же для последующей развертки вычисляется когерентность. На следующем этапе вводится поправка за влияние перпендикулярной базовой линии и топографии, и, при необходимости, выполняется фильтрация длиннопериодных компонент. Далее ищутся отражающие площадки, на которых влияние шумов минимально. Для них полученные значения фаз выстраиваются в последовательный временной ряд и далее рассчитывается стартовая оценка средних скоростей смещений (деформаций). Затем с помощью фильтрации временных рядов из интерферограмм устраняется атмосферная компонента (полагается, что атмосферные помехи медленно меняются в пространстве, но быстро – во времени), выполняется геокодирование полученных данных (переход из координат снимка в наземные координаты с помощью созданной таблицы аффинных преобразований). Результирующие данные представляют собой карты средних скоростей смещений за весь период,

охваченный спутниковыми снимками, и временные серии смещений, накопленных ко времени выполнения очередного снимка. На этом этапе также возможна коррекция ЦМР, поскольку погрешности в ЦМР создают фазовые смещения, прямо пропорциональные перпендикулярной базовой линии. Пример расчета в сложных условиях (горный рельеф, атмосферные помехи, небольшое отношение сигнал / помеха) методом SBaS по серии из 35-ти спутниковых снимков Sentinel-1A, полученных за 3 года, приводится в [24].

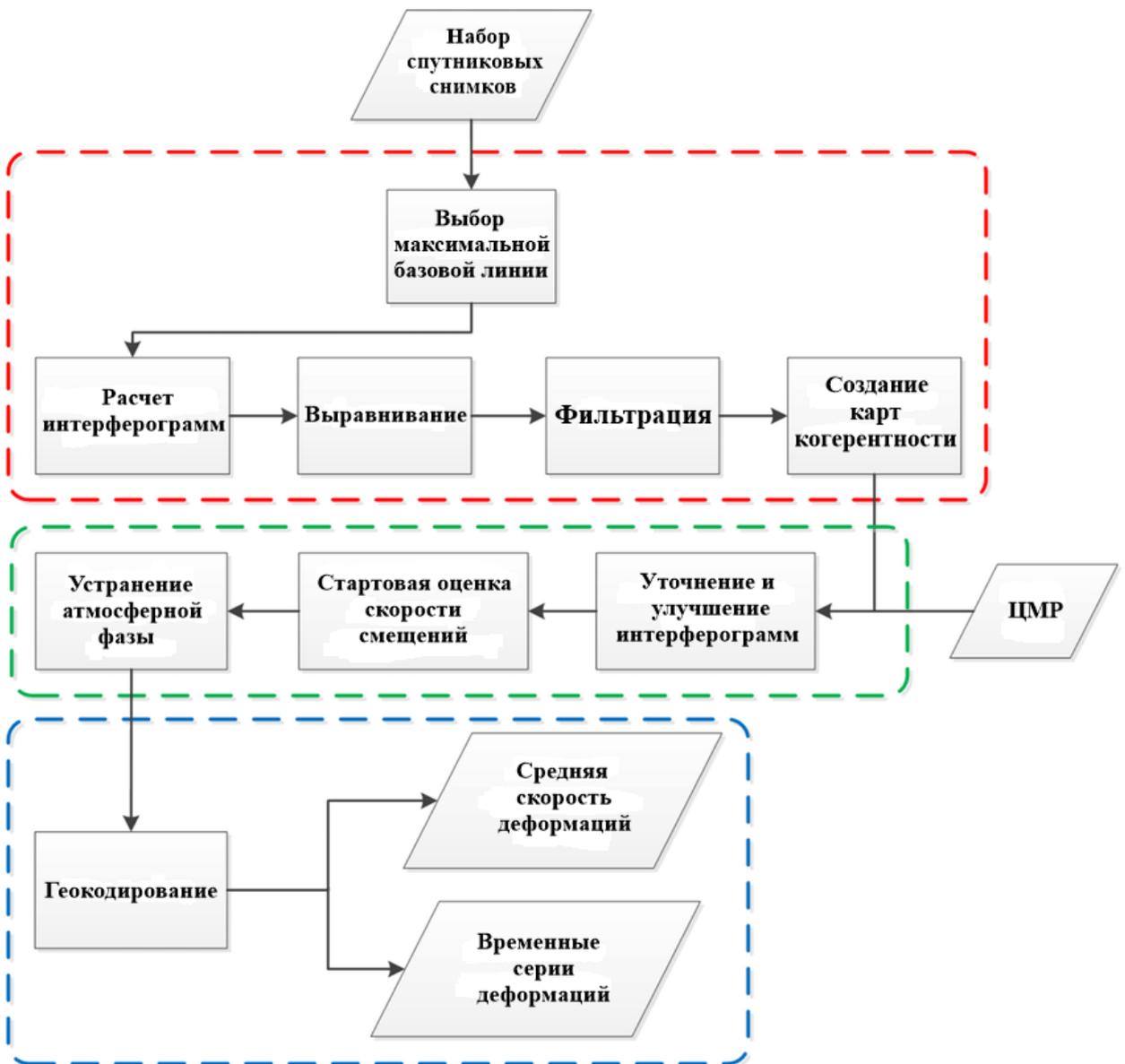


Рисунок 1.3 – Блок-схема обработки интерферометрических данных методом SBaS

1.2.2 Методы устойчивых отражателей

Метод устойчивых отражателей или постоянных рассеивателей (англ. *PS*, *Permanent/Persistent Scatterers*), или PSInSAR, впервые предложенный в 2000 году группой

итальянских исследователей [50, 51], за последующие годы получил развитие: были предложены несколько десятков его модификаций [42]. Модификации метода развивались в трех направлениях – отбор пар снимков («супермастер», малые базовые линии), выбор устойчивых отражателей (корреляция их амплитудных характеристик, порог когерентности, пространственное и/или временное отклонение величин смещений первой итерации, или их комбинация) и используемая модель деформаций земной поверхности (линейная, пространственно сглаженная, ступенчатая линейная и т.д.). Развитие технологии метода устойчивых отражателей позволило достичь очень высокой точности определения средней скорости смещений, оцениваемой в первые миллиметры в год (доли длины волны радиолокатора) [53, 64].

В качестве исходных данных используется несколько десятков спутниковых снимков территории, полученных одной и той же радиолокационной системой. После процедуры корегистрации вычисляются интерферограммы; поскольку устойчивые отражатели стабильны во времени, фактически, все интерферограммы рассчитываются относительно одного и того же мастер-снимка. Затем для каждой пары рассчитываются карты когерентности и стандартных отклонений амплитудных составляющих снимков. Следующий важный этап – выбор устойчивых отражателей, возможные критерии отбора были перечислены выше. Для отобранных точек выполняется вычисление разности фаз за период между парами снимков. По полученным разностям фаз оценивается и, по возможности, устраняется атмосферная компонента. В результате, создается каталог точек – устойчивых отражателей, содержащий координаты, высоты, когерентность, суммарное смещение за весь период наблюдений и смещения, вычисленные на каждую дату снимка. Примеры использования данной технологии для оценки вулканической деятельности и других природных процессов представлены в [52, 61, 62].

Недостатком при использовании данной технологии является необходимость наличия достаточно длинной серии спутниковых снимков и значительного количества точек, имеющих высокую отражающую способность (такие устойчивые отражатели характерны для городских и техногенных территорий, лишённые растительности выходов скальных пород). В лесах и полях при обработке снимков можно встретить единичные (случайные) точки с хорошей когерентностью и это обстоятельство накладывает ограничение на применение данного метода.

1.2.3 Метод IPTA – интерферометрический анализ точечных целей

Модификация метода устойчивых отражателей была предложена группой швейцарских исследователей в 2004 году [88] и в 2008 году ими был выпущен программный пакет GAMMA Software, позволяющий выполнять обработку спутниковых снимков по всем перечисленным

выше методам. Предложенный ими метод IPTA (англ. *Interferometric Point Target Analysis*, «интерферометрический анализ точечных целей») – заключается в использовании временных и пространственных характеристик интерферометрических сигналов, собранных с точечных целей, для точного отображения истории деформации поверхности, высоты местности и определения влияния атмосферы на интерферометрическую фазу. Рекомендуемая схема обработки метода IPTA представлена на рисунке 1.4. Поскольку этот метод широко использовался нами при расчетах смещений с целью мониторинга оседаний [2, 33], последовательность обработки спутниковых снимков будет изложена более подробно.



Рисунок 1.4 – Рекомендуемая схема обработки интерферометрических данных методом IPTA

Процесс обработки начинается с подготовки набора спутниковых снимков, также требуются файлы уточненных параметров орбит и специальный текстовый файл, в котором содержится информация, какие пары снимков примут участие в дальнейшей обработке (для выбора пар снимков можно ограничить пространственную базовую линию, можно – временную, или задать оба параметра). Также на этом этапе можно подготовить ЦМР, наилучшим образом описывающую исследуемую территорию, создав таблицу пересчета между радарными и наземными координатами и перекодировав ЦМР в координаты мастер-снимка. Одновременно с этим создается карта затенений и наложений луча радиолокатора (англ. *layover-shadow map*), которая будет в дальнейшем использована для маскирования точек-кандидатов.

Второй этап обработки определяет список целевых точек-кандидатов на основании имеющихся спутниковых снимков. Точкой-кандидатом в пакете IPTA считается пиксель, в

отраженном сигнале которого доминирует один отражающий объект, стабильно проявляющийся на фоне остальных отражателей в пределах пикселя. Критерием первоначального выбора точки является низкая изменчивость коэффициента обратного рассеяния. Этот подход применим при наличии большого количества спутниковых снимков. В случае ограниченного набора снимков, применяется альтернативный подход – отбираются точки с высоким коэффициентом обратного рассеяния и малой изменчивости фазы. В дальнейшем список точек-кандидатов может уточняться.

Следующей процедурой является корегистрация всех снимков на выбранный мастер-снимок. Результат корегистрации записывается последовательно в созданный ранее каталог точек-кандидатов. Таким образом, все снимки становятся пространственно совмещенными.

После корегистрации происходит вычисление дифференциальных интерферограмм, путем моделирования и вычитания фазы, соответствующей данным о величинах базовых линий и доступной ЦМР. В зависимости от условий съемки, полученные дифференциальные интерферограммы могут быть гладкими или зашумленными. Полученные данные формируют «стек», в котором также записаны ранее полученные результаты обработки. На этом этапе обычно не используется информация об атмосферных помехах и об ожидаемых деформациях земной поверхности.

На следующем шаге обработки анализируется набор (стек) дифференциальных интерферограмм. В случае достаточно большого числа записей стека, анализируются все записанные слои, в первую очередь во временной области, т.е. по всем интерферограммам стека. Ошибки в ЦМР порождают фазовые сдвиги, которые прямо пропорциональны перпендикулярной базовой линии. Если временной ряд смещений точечной цели содержит компоненту, пропорциональную базовой линии, то такая компонента вычитается, а коэффициент линейной регрессии, равный погрешности в определении высоты, добавляется в ЦМР. Стандартное отклонение фазы включает в себя фазовые составляющие помех, атмосферных задержек, деформаций земной поверхности и ошибки определения перпендикулярных базовых линий. За исключением помех, все остальные составляющие зависят от временного интервала между двумя снимками. Следовательно, для пар с небольшой временной базовой линией можно провести регрессионный анализ, не обращая внимания на поведение других фазовых составляющих. При этом, регрессия дополнительно улучшается и становится более надежной за счет учета линейной зависимости фазы от времени, эквивалентной постоянной скорости деформации.

Следует учесть, что фаза все еще свернута по модулю 2π , поэтому для небольшого количества спутниковых снимков приходится делать развертку фазы. Для этого необходимо выбрать референсную точку для проведения процедуры развертки – она должна

характеризоваться достаточной плотностью близлежащих точек и находиться в стабильной области. Для большого стека данных возможно применение нелинейной регрессии, без развертки фазовой составляющей. Стандартное отклонение фазы от регрессии используется в качестве меры качества, позволяющей обнаруживать и отбрасывать точки-кандидаты не подходящие для дальнейшего анализа. Этот регрессионный анализ выполняется для всего набора точек.

В результате проведенного регрессионного анализа определяются коррекции высоты, оценки линейной деформации, остаточная фаза и развернутая интерферометрическая фаза. Все эти рассчитанные элементы используются для улучшения модели. Например, коррекции высоты добавляются к использовавшейся ЦМР для построения теоретической интерферограммы от рельефа. Остаточная фаза содержит атмосферную фазу, которая связана с разными условиями прохождения радиолокационного луча через тропосферу и ионосферу при первой и второй съемке пары снимков, а также с нелинейным поведением временных рядов смещений (т.е. изменением скорости смещений во времени) и погрешностями задания параметров съемки.

Фазовые составляющие можно различать на основе их пространственных и временных особенностей. Атмосферные задержки сигнала проявляются как компоненты – низкочастотные по пространству, но некоррелированные между съемками, т.е. по времени. Скачки скорости смещений точечной цели обычно не коррелируют ни в пространстве, ни во времени, но бывают и исключения. Ошибки, связанные с базовой линией, проявляются в фазовом поле в виде низкочастотных компонент. Наконец, фазовый шум случаен как в пространственной, так и во временной области.

Важным аспектом применения метода ИРТА является возможность поэтапного итеративного уточнения различных параметров – основными являются поправки высоты, скорость смещений, атмосферный набег фазы. Также происходит и расширение списка точек-кандидатов. То есть, после итеративного улучшения деформационной модели, необходимо снова проверить список точек, поскольку среди них могут появиться дополнительные точки, которые могут удовлетворять критериям отбора. В тоже время, многократное повторение этих шагов может привести к постепенному переводу части полезного сигнала в различного рода помехи. В сложных случаях необходимо разрабатывать технологию обработки снимков, специально предназначенную для конкретной ситуации, корректируя ее путем анализа получаемых результатов и сопоставляя с доступными наземными данными.

1.3 Метод офсетов

Перечисленные выше методы обработки спутниковых снимков обладают высокой точностью определения смещений земной поверхности при условии достаточно медленных

процессов оседаний как по времени, так и в пространстве. Это связано с тем, что результирующая свернутая интерферограмма при наличии деформаций земной поверхности выглядит как набор интерференционных полос (англ. *fringe*). Каждой такой полосе соответствует изменение разности фаз на 2π , чему в смещениях соответствует половина длины волны радиолокатора. То есть, для снимков спутника Sentinel-1A с длиной волны 5.6 см, каждая интерферометрическая полоса будет означать смещение земной поверхности (в проекции на линию видения спутника) на 2.8 см. Как уже отмечалось, задача развертки фазы не имеет единственного решения – в каждой точке можно прибавить произвольное число периодов. Поэтому развертка выполняется под условием гладкости развернутого поля смещений, в котором разность смещений в соседних пикселях не превосходит половины длины волны. В случае интенсивных смещений, интерферометрическая картина становится нечеткой, как следствие – развертка фазы выполняется с ошибками.

Для решения задач по расчету и последующему анализу больших локализованных смещений применяется метод офсетов [17, 41, 63, 84, 89 и др.], также входящий в программный комплекс GAMMA Software. Он был использован при обработке спутниковых снимков Sentinel-1A для построения модели поверхности разрыва землетрясения в Турции, произошедшего 6.02.2023 г. [29, 30].

Первый этап обработки методом офсетов заключается в процедуре корегистрации снимков. Затем выполняется начальное приближение – примерная оценка величины сдвига отдельных участков одного снимка относительно другого. Для этого вычисляется значение кросс-корреляции амплитудной части снимка в скользящих окнах большого размера (например, 256×128 пикселей). Положение максимума двумерной функции кросс-корреляции определяет офсет (смещение) по азимуту и дальности в координатах снимка. Полученный результат подвергается статистической обработке с целью оценки качества данных и удаления случайных шумов. Для этого используются: порог функции кросс-корреляции; абсолютные значения пределов офсетов по азимуту и дальности; разности между исходными и пространственно отфильтрованными значениями офсетов по азимуту и дальности. Они формируют растровую маску данных, которая используется для исключения области расчетов с низкими показателями надежности определения офсетов. Если области, которые представляют интерес для исследования, оказываются исключенными, можно попытаться скорректировать пороги выбранных ограничений или воспользоваться утилитой восполнения данных, основанной на интерполяции в окне небольшого радиуса с весовыми коэффициентами, используя адаптивное сглаживающее окно. Далее размер скользящих окон уменьшают в несколько раз и повторяют вычисления функции двумерной кросс-корреляции. Области, на которых были выявлены превышения выбранных порогов, в расчетах не участвуют. Получив значения офсетов в меньшем

окне, можно снова оценить статистические характеристики и снова уточнить полученный результат. Обычно достаточно двух итераций.

Следующий этап обработки вводит поправку за геометрию съемки: полученные смещения определяются не только смещением поверхности за время между съемками, но и орбитальной компонентой офсетов, определяемой перпендикулярной базовой линией, и углом между направлением полета спутника в момент съемки первого и второго снимков.

Полученные смещения в пикселях (в координатах снимка) переводят в метры и геокодируют 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 направлении.

Точность метода оценивается не хуже, чем $1/20$ размера пикселя, т.е. более 1.0 метра для снимков спутника Sentinel-1A (размер пикселя снимка в наземных координатах составляет примерно 5 метров по дальности и 20 метров по азимуту для режима съемки IW). Поэтому метод офсетов применяется для областей со смещениями в первые метры и более, как, например, в окрестности области разрыва крупного землетрясения (глава 5).

Заметим, что метод офсетов применяется также к оптическим снимкам высокого разрешения.

Выводы по главе 1

Для определения смещений земной поверхности и объектов инфраструктуры методами спутниковой радарной интерферометрии в данной работе применялись различные методы: дифференциальная интерферометрия, основанная на анализе пар спутниковых снимков, различные модификации методов устойчивых отражателей, метод офсетов. Эффективность применения методов зависит от характера смещений (обширные или локальные поля смещений, медленные или скачкообразные смещения, смещения малой или большой величины и т.д.). В простых ситуациях (хорошие метеоусловия, длинные серии снимков, пологий рельеф, небольшие перпендикулярные базовые линии между точками съемки, устойчивые смещения величиной от 5-10 см за период между снимками, наличие хорошо отражающих объектов и т.д.) оценка полей смещений не представляет проблем. Однако, такие идеальные ситуации встречаются достаточно редко.

Программный комплекс GAMMA Software, который в основном использовался при выполнении расчетов данной диссертационной работы, содержит обширный набор разнообразных процедур, реализующих различные этапы обработки снимков, с применением различных методов и подходов. При вычислении парных интерферограмм и временных рядов

смещений пользователь самостоятельно создает граф обработки, определяя в виде последовательности командных строк, применяемые методы и их параметры. В сложных ситуациях приходится разрабатывать оптимальную технологию обработки снимков путем анализа получаемых результатов и сопоставления с наземными данными – там, где они доступны. К таким сложным областям относятся территории разработки калийных солей в районе городов Березники и Соликамск (Пермский край, Россия), для которых в работе предложены две различные технологии, позволяющие оценивать поля смещений при наличии областей с низкой когерентностью (лесные массивы, пахотные поля). Технология и полученные с их помощью результаты представлены в главах 2-3.

В случае смещений величиной в несколько метров, как в очаговой области крупных землетрясений, эффективным является метод офсетов, основанный на оценке смещений вдоль азимута и наклонной дальности путем анализа амплитуды отраженного радарного сигнала по двум спутниковым снимкам. На основе этого метода оценены поля смещений и построена модель поверхности разрыва для землетрясения в Турции 6 февраля 2023 г. (глава 5).

Отдельную проблему представляет оценка трех компонент вектора смещений по данным о смещениях на спутник, полученных с одной или совместно с двух орбит (формула 1.4). Вопросы оценки смещений по данным с одной и двух орбит над подземными хранилищами газа (ПХГ) и областями разработки калийных солей столбовым методом подробно рассмотрены в главе 4.

2 Технология оценки оседаний на подработанных территориях в г. Березники и г. Соликамск

2.1 Постановка задачи

В Пермском крае расположено крупнейшее в России месторождение калийных и магниевых солей. Добыча солей ведется подземным способом, разведанная соленосная толща протягивается с севера на юг на 135 км и с запада на восток – на 40 км. Непосредственно над шахтными разработками располагаются города Березники и Соликамск. При подземной разработке солей необходимо оставлять ненарушенным слой водонепроницаемых пород (водозащитная толща), который находится между кровлей отработываемого пласта и подошвой водоносного горизонта. В случае его повреждения приток воды начинает растворять соляные породы. Процесс разрушения быстро нарастает и в итоге приводит к затоплению рудника. Камерная разработка соленосных пород позволяет сохранить водозащитную толщу [9].

Оседания земной поверхности с небольшой скоростью, связанные с ведением горных работ, в городе Березники происходили много лет. Но в 2006 году произошла крупнейшая в мировой практике авария – был затоплен рудник Первого Березниковского калийного рудоуправления, который расположен под городом Березники с населением около 150 тыс. человек [7]. После аварии был расширен комплекс мер по сохранению водозащитной толщи. Также регулярно проводятся геодезические и гравиметрические измерения с оценкой временных трендов, регистрируется техногенная сейсмичность, выполняется численное геомеханическое моделирование, при этом численные модели калибруются с использованием данных об оседаниях земной поверхности. На основе всех этих работ создана система комплексного мониторинга, которая позволяет спрогнозировать развитие опасных ситуаций и реализовать необходимые меры по защите рудников и расположенных над ними селитебных территорий [8]. В качестве эффективного метода мониторинга оседаний ранее на территории соляных шахт г. Березники осуществлялся спутниковый мониторинг [15], который после значительного перерыва был возобновлен в 2020 году силами ИФЗ РАН при активном участии автора данной диссертационной работы.

Целью проводимых ИФЗ РАН работ является создание и практическое применение различных технологий мониторинга оседаний земной поверхности на территории городов Березники и Соликамск методами РСА-интерферометрии. Данную территорию в настоящее время снимают тандемная пара спутников TerraSAR-X и TanDEM-X, до конца 2021 г. так же выполнялась съемка спутником Sentinel-1B. Сложность мониторинга здесь состоит в наличии пересеченного рельефа, густых лесов и отгороженных опасных территорий, создающих

обширные некогерентные области, мощного снежного покрова зимой, сокращающего период проведения мониторинга до 5-6 месяцев. Амплитудный снимок территории г. Березники показан на рисунке 2.1. Цифрами показаны основные области оседаний, за которыми ведется постоянный мониторинг. Более подробно каждая из указанных областей будет рассмотрена ниже.

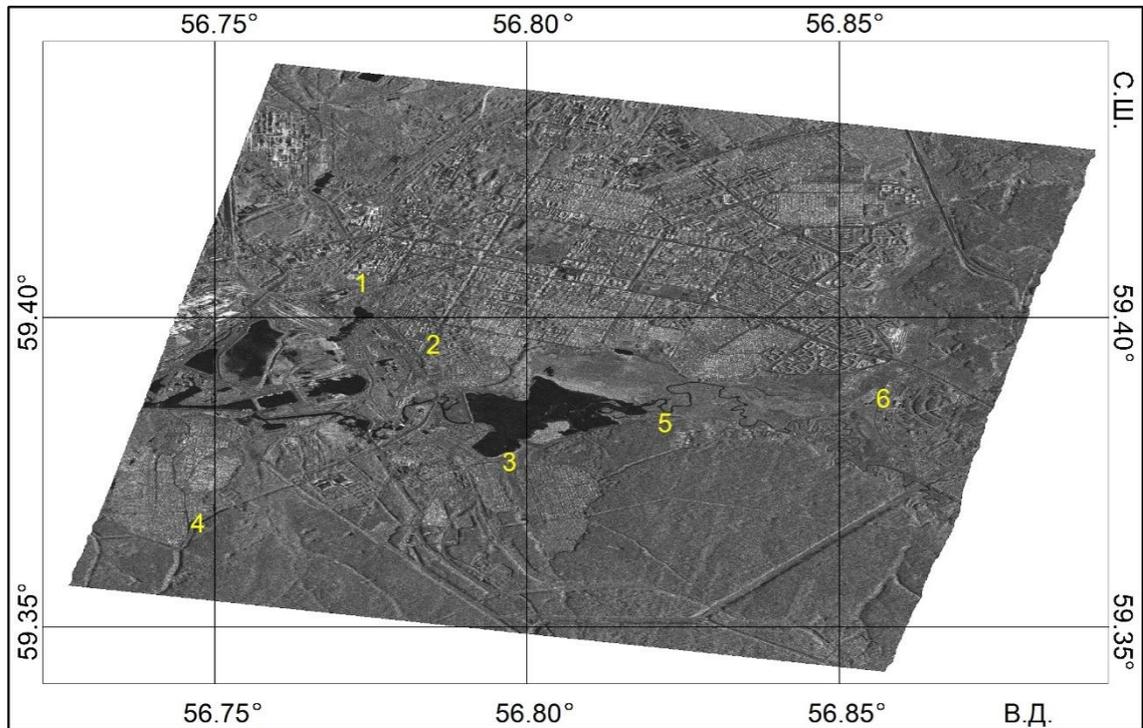


Рисунок 2.1 – Амплитудный снимок г. Березники и прилегающих территорий. Цифрами показаны: 1 – закрытая территория провалов 3 и 4 у ж/д вокзала; 2 – область оседаний в районе пр-та Ленина и «Панели переходного периода»; 3 – поселки Нартовка, Зырянка и Новая Зырянка; 4 – пос. Чкалово; 5 – базы отдыха «Строитель», «Лесная сказка» и пионерлагерь; 6 – агрофирма «Суханово»

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 оценка и анализ средних скоростей смещений за бесснежный период с целью анализа динамики развития оседаний и эффективности применяемых защитных мероприятий. Решение этой задачи потребовало разработки нестандартных технологий обработки радарных снимков.

2.2 Технология спутникового мониторинга оседаний земной поверхности в условиях Пермского края

Для регулярного анализа смещений с интервалом в 11 дней была использована стратегия обработки парных интерферограмм, рассчитанных по снимкам спутников TerraSAR-X 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 либо по соответствующим снимкам, а при наличии временной декорреляции снимков, выполненных через 33 дня, методом суммирования результатов, полученных за интервалы в 11 и 22 дня. Такой вариант обработки был использован потому, что большая 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, рассчитанная через 22 или 33 дня, имеет более высокое соотношение сигнал/шум, что облегчает процесс обработки и выделения полезного сигнала.

Одной из основных проблем при обработке спутниковых снимков является низкая когерентность. Как было показано в главе 1, когерентность есть мера сходства (уровень декорреляции) двух изображений, принимающая значения от 0 (некогерентная область) до 1 (идеально когерентная область). На рисунке 2.2 представлена карта когерентности двух спутниковых снимков от 24 апреля и 16 мая 2022 г. 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 [53], 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 обладает достаточно хорошей когерентностью; напротив, огороженные опасные территории провалов в городской черте, а также залесенные территории – практически некогерентны. Летом и осенью ситуация ухудшается – становится еще меньше высококогерентных пикселей, что дополнительно осложняет обработку спутниковых снимков.

Низкая когерентность на большей части территории г. Березники и небольшие величины ожидаемых смещений потребовали создания специальной технологии мониторинга путем комбинирования различных методов обработки спутниковых снимков. Технология основана на комбинировании двух методов, названных нами *Std* (является расширением стандартных процедур) и *Step* (пошаговый метод развертки). 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, в плане практически сопоставимая с размерами пикселя радиолокатора (т.е. 3×3 метра для TerraSAR-X и 5×20 м для Sentinel-1).

Одним из главных методов подавления помех в низко когерентных областях является некогерентное осреднение вдоль и поперек орбиты (по азимуту и по наклонной дальности, соответственно). Эта операция называется мультилукинг (англ. *multilooking*). Размер пикселя в исходном снимке TerraSAR-X в радарных координатах равен 0.91 м по наклонной дальности и 1.9 м по азимуту. В методе *Std* в основном применяется мультилукинг с фактором 2×1 , который делает пиксель почти квадратным (1.8×1.9 м). Иногда требовалось увеличение мультилукинга еще в два раза (фактор 4×2) – в этом случае размер пикселя равен 3.6×3.8 м. Увеличение размера области осреднения подавляет помехи (спекл-шум) и увеличивает отношение сигнал/шум, но приводит к осреднению смещений в пределах увеличенного пикселя.

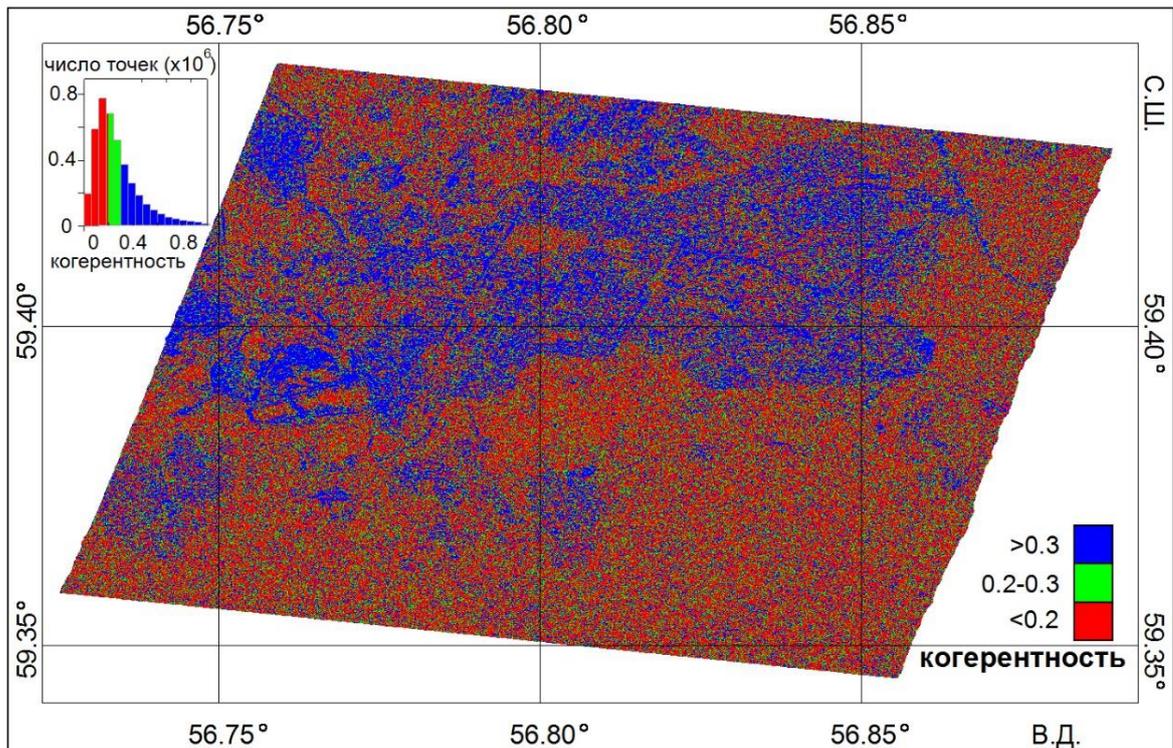


Рисунок 2.2 – Карта когерентности снимков от 24 апреля и 16 мая 2022 г. на территорию г. Берзники

Как уже обсуждалось в главе 1, фаза принимаемого спутником отраженного сигнала известна с точностью до целого числа полных периодов, т.е. свернута по модулю 2π . Для получения истинной фазы, равной величине смещений деленной на длину волны радарного сигнала, необходимо выполнить операцию развертки фазы, которая сводится к добавлению к свернутой фазе целого числа периодов. Поскольку развертка интерферограммы является

неоднозначной процедурой, то при ее выполнении ищут гладкое поле смещений, в котором смещения в соседних пикселях отличаются не более чем на половину длины волны. При хорошей когерентности снимков и градиенте поля смещений меньше половины длины волны на пиксель (1.5 см для спутника TerraSAR-X), выполнение развертки не вызывает больших проблем. В областях с низкой когерентностью (обычно это области с низкой отражательной способностью, или области, где отражения неустойчивы, такие как лесные массивы, болота, пахотные поля), т.е. там, где свернутая интерферограмма зашумлена, развертка может выполняться с ошибками. Это, в частности, может проявляться в большой величине полученных смещений, в резком изменении ее знака по площади, возникновении регионального наклона в поле смещений. Эти артефакты могут быть устранены при правильном выборе стратегии развертки. Для этого нами использовалась растровая маска, запрещающая развертку фазы в областях с когерентностью менее 0.2, а значения выше 0.2 использовались в качестве показателя весовой функции при выполнении процедуры развертки. Также, если при анализе карт смещений обнаруживалась региональная составляющая, она устранялась путем вычитания длиннопериодного линейного или квадратичного фона. Обычно такая составляющая возникает из-за ионосферных или атмосферных возмущений (дождь, туман, снег), реже – из-за орбитальных ошибок.

Результирующие карты представляют собой так называемые субвертикальные смещения, вычисленные в предположении, что горизонтальные смещения невелики по сравнению с вертикальными. Напомним, что спутниковая интерферометрия дает смещения объекта на земной поверхности в направлении линии распространения излучения спутника (т.е. вдоль линии, направленной от объекта на спутник). Спутник TerraSAR-X излучает сигнал под углом к вертикали равным в среднем 35.4° . Если смещения земной поверхности происходят в основном по вертикали (т.е. горизонтальные смещения малы по сравнению с вертикальными), то чтобы из смещений на спутник получить смещения по вертикали, надо величины смещений в направлении на спутник разделить на косинус угла наклона зондирующего луча спутника, т.е. на $\cos(35.4^\circ)$. В результате величины смещений увеличиваются примерно в 1.23 раза, т.е. почти на четверть. При практических расчетах используются точные углы наклона зондирующего луча для каждой отражающей площадки, поставляемые вместе с радарным снимком. Подробнее об этом было сказано в главе 1.

Метод *Std* включал следующую последовательность действий.

1. Распаковка данных архива со спутниковым снимком и вырезание области счета (кроп).
2. Интерполяция (оверсэмплинг) по дальности, с уменьшением размера пикселя в 2 раза, позже мультилукинг будет проведен с учетом интерполяции (т.е. с фактором 4 по дальности и фактором 1 по азимуту), для получения пикселя, размерами близкого к квадратному.

3. Подготовка цифровой модели рельефа (ЦМР) для области счета и таблицы пересчета радарных координат в наземные и обратно.
4. Корегистрация второго (slave) снимка на первый (master).
5. Расчет фазы от рельефа дифференциальной интерферограммы.
6. Вычисление дифференциальной интерферограммы (учитываются поправки за ЦМР, перпендикулярную базовую линию и кривизну Земли).
7. Мультилукинг корегистрированного снимка.
8. Расчет когерентности по интерферограмме и двум снимкам после мультилукинга.
9. Используя рассчитанную когерентность, выполняется её преобразование в растровый формат (создается растровая маска), задав минимальный порог когерентности (обычно 0.2).
10. Выполняется развертка интерферограммы, используя полученную ранее маску растра, методом «Minimum cost flow», с использованием референсной (стабильной, высококогерентной) точки.
11. Фильтрация интерферограммы пространственным фильтром с небольшим размером окна для уменьшения шума.
12. Устранение тренда 1-го порядка, и после этого пересчет развернутой фазы в смещения земной поверхности (рассчитываются субвертикальные смещения, в предположении их преобладания над горизонтальными).
13. Поле смещений пересчитывается из радарных координат в наземные, создается результирующий файл формата geotiff для работы в графических пакетах.

При подготовке ЦМР-модели используется свободно распространяемая цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 1 угловая секунда (Copernicus DEM), что соответствует пространственному разрешению порядка 30 метров, и является менее детальным, чем разрешение снимка TerraSAR-X. Для того чтобы избежать закругления получаемых результатов, при создании модели рельефа необходимо проинтерполировать исходные данные. В расчетах по проекту используется фактор 8 и по широте, и по долготе. В результате, модель рельефа имеет ячейку размерами 3.8 x 5.7 м.

Проведенное исследование по применению фильтрации показало следующее. Мультилукинг (с фактором 4 x 1) 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 разворачивания фазы, наилучшие результаты были получены при фильтрации уже развернутой интерферограммы, с использованием пространственного минимально-квадратичного фильтра с шириной окна не более 3-х пикселей.

В некоторых случаях, при неблагоприятных погодных условиях в моменты съемки, атмосферные эффекты могут внести существенные искажения в рассчитанную карту смещений земной поверхности. В этом случае обработка снимков должна включать процедуру устранения атмосферной компоненты. Подавление атмосферных и ионосферных эффектов выполняется путем фильтрации фазовой компоненты с предварительным исключением высокоградиентных фазовых областей, и результат вычитается из исходной интерферограммы.

Итак, отличительными особенностями метода *Std*, разработанного для специфических условий территории г. Березники и г. Соликамск, являются:

- выполнение интерполяции на более частую сетку (*oversampling*) только по дальности до проведения корегистрации и введения поправок за топографию, базовую линию и кривизну Земли, а также расчет дифференциальной интерферограммы;
- проведение фильтрации после процедуры развертки;
- подавление атмосферных эффектов на основе выявленных больших поправок к модельной ЦМР и/или больших расчетных смещений земной поверхности.

Этим метод *Std* отличается от стандартных процедур обработки снимков, рекомендуемыми, например, Европейским космическим агентством на сайте <https://step.esa.int/main/doc/tutorials/> или справочными материалами к коммерческим пакетам SARscape и GAMMA Software.

Метод *Step* заключается в следующем. После расчета дифференциальной интерферограммы (пункты 1-6 идентичны методу *Std*) проводится ее некогерентное осреднение – мультилукинг (обычно с фактором 5), это позволяет существенно упростить развертку фазы. Выбирается референсная точка (не подверженная деформациям земной поверхности, с хорошей когерентностью) и выполняется развертка фазы. Затем развернутая фаза фильтруется и пересчитывается на исходную сетку снимка. Далее из исходной свернутой фазы вычитается полученный результат, предварительно свернутый по модулю 2π , и эта разность, характеризующая более локальные смещения земной поверхности, снова осредняется с помощью мультилукинга (снова с фактором 5), разворачивается относительно ранее выбранной точки, фильтруется и снова пересчитывается на исходную сетку снимка, и добавляется к ранее полученной результирующей фазе. Каждая последующая процедура уменьшает фазовый остаток (разность между исходной и подобранной разностью фаз двух снимков), обычно достаточно трех итераций. Так создается фазовая референсная модель. Далее выполняется развертка исходной интерферограммы, также с выбором референсной точки, 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 фазы, с другой – развернутая фаза рассчитывается даже в тех областях снимка, в которых когерентность

оказывается ниже выбранного порога. Дальнейшая обработка идентична пунктам 11-13 метода *Std*.

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 несколько более сглаженная картина смещений. Таким образом, методы *Std* и *Step* дополняют друг друга, позволяя получить совместную картину происходящих смещений земной поверхности на территории г. Березники и г. Соликамск. При хорошей когерентности 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 [43].

Выводы по главе 2

Данная глава обосновывает первое защищаемое положение: «Технология оценки полей смещений земной поверхности по спутниковым радарным снимкам методом дифференциальной интерферометрии для территорий с обширными некогерентными областями, включающая два метода, дополняющие друг друга и позволяющие одновременно оценивать смещения в высоко когерентных и низко когерентных областях».

Подробное обоснование технологии численными расчетами, сравнение работы различных методов, включая метод суммирования и метод устойчивых отражателей, а также сопоставление с данными наземной геодезии дано в главе 3.

3 Результаты мониторинга движений на подрабатываемых территориях гг. Березники и Соликамск на основе разработанных технологий и метода анализа временных рядов оседаний

3.1 Выбор технологии мониторинга для подработанной территории г. Березники

В результате комплексного анализа имеющихся наземных и спутниковых данных, были выделены две большие по площади области в г. Березники и на его южной окраине (называемые далее области «А» и «В»), в которых в настоящее время продолжают оседания земной поверхности (рисунок 3.1). Область «А» включает территории провалов 3, 4 и протягивается от здания железнодорожного вокзала на северо-западе до улицы Котовского на юго-востоке и от солеотвала Березниковского калийного производственного рудоуправления № 1 (БКПРУ-1) и провала № 2 на юго-западе вдоль проспекта Ленина до ул. Тельмана и ул. Коммунистической на севере-востоке. Область «В» – это территории поселков Нартовка, Зырянка и Новая Зырянка, расположенных южнее г. Березники. В указанные области не входят поселок им. Чкалова, базы отдыха на южном берегу Нижнезырянского водохранилища, и агрофирма Суханово, по которым так же был проведен анализ смещений за период мониторинга 2020 – 2022 годов.

В процессе мониторинга оседаний в 2020 – 2022 гг. проводилась доработка методов *Std* и *Step* и выполнялся детальный сравнительный анализ их работы на различных подрабатываемых территориях. На основании выполненного анализа сделаны следующие заключения:

1. В благоприятных условиях (хорошие погодные условия съемки, негустая растительность) оба метода дают близкие результаты (рисунок 3.2 А и Б).

2. В сложных условиях съемки (дождь, туман, густая растительность, увеличенная базовая линия между снимками) для г. Березники и его окрестностей более эффективным оказывался метод *Step*, который хотя и немного сглаживает карту смещений, но позволяет оценивать смещения на значительной части области исследований. Метод *Std* при низкой когерентности дает фрагментарную карту, оценивая смещения только в когерентных пикселях (рисунок 3.2 В и Г). Поэтому для территории г. Березники расчеты проводились обоими методами, при этом основным был метод *Step*, а полученные результаты сопоставлялись с результатами, которые были рассчитаны методом *Std* в когерентных областях.



Рисунок 3.1 – Карта района основных оседаний в г. Березники и его окрестностях (области «А» и «В»), карта города взята с интернет-сайта <http://OpenStreetMap.org>

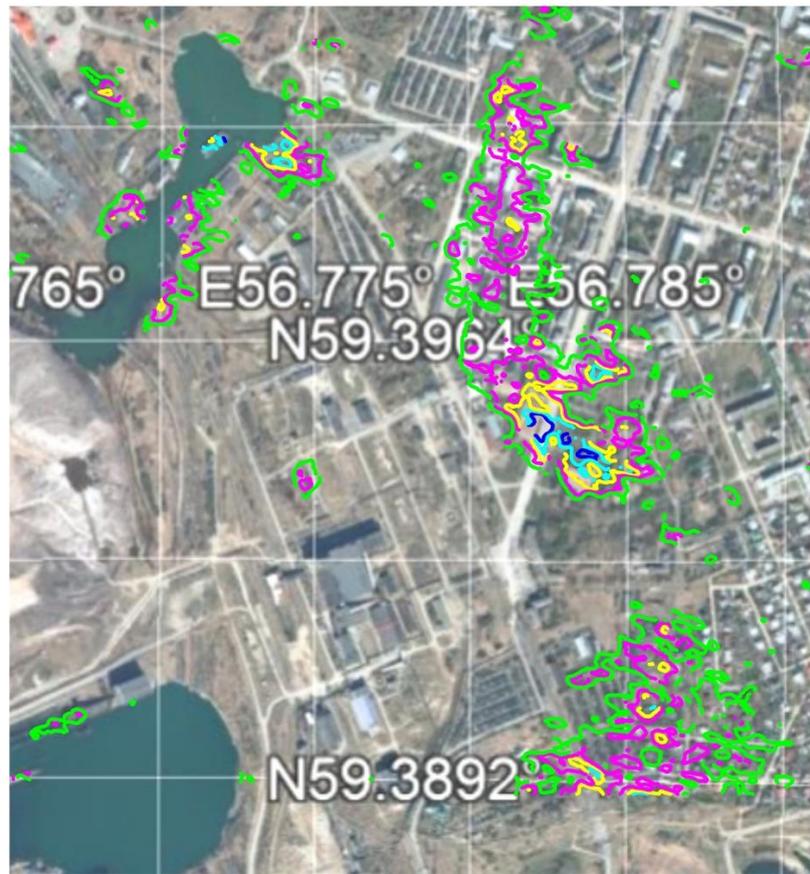
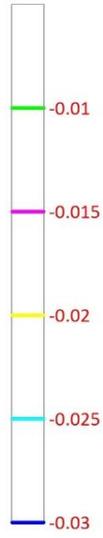
3. На подрабатываемой территории горного отвода Соликамского калийного рудоуправления № 2 (СКРУ-2), южнее г. Соликамска, когерентных областей относительно немного. Это небольшие поселки, дороги, техногенная инфраструктура, разделенные обширными некогерентными массивами (леса, пахотные поля), в которых оценивать смещения обычно не удастся. Метод *Std* систематически давал устойчивые оценки смещений, но только в областях с высокой когерентностью. В силу применения осреднения в больших окнах, метод *Step* дает оценки смещений даже там, где когерентность – ниже заданного порога. В окрестности

когерентных областей смещения, полученные по методу *Step*, стабильны во времени и их можно использовать для анализа, но в обширных некогерентных областях метод *Step* иногда дает чередующиеся области положительных и отрицательных смещений, положение которых не стабильно и меняется от одной интерферограммы к другой. Поэтому для подработанных территорий СКРУ-2 более предпочтительным является метод *Std*. Мы вернемся к рассмотрению результатов по этому району позже.

На рисунке 3.2 А-Г приведены два примера сравнения работы двух методов. На рисунке 3.2 А и Б показан пример определения смещений в хороших условиях (минимальное влияние атмосферы, отсутствие осадков, малая пространственная базовая линия). Видно, что оба метода дали детальные, очень близкие результаты. На рис. 3.2 А смещения несколько больше у провала у железной дороги и от ул. Тельмана на юг, до проспекта Ленина. Южнее проспекта Ленина, в пределах огороженной зоны, метод *Std* не дал результатов, но ближе к ул. Котовского снова получены смещения близкие к тому, что дали расчеты по методу *Step*.

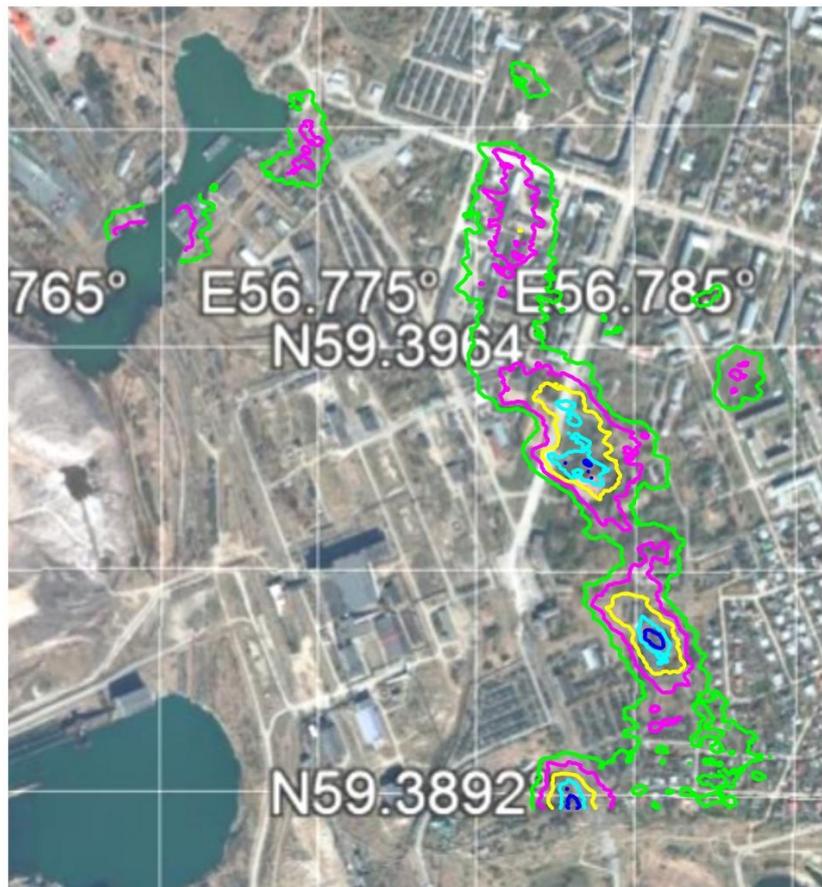
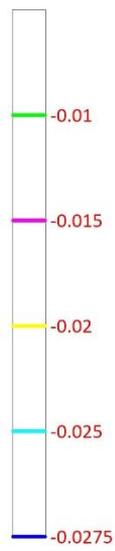
На рисунке 3.2 В и Г приведен пример работы в сложной ситуации: неблагоприятные погодные условия и развитый растительный покров. Метод *Std* определил смещения в относительно небольшом количестве пикселей, хотя там, где смещения определены, они совпадают со значениями, определенными методом *Step*. Методом *Std* смещения почти не удалось получить южнее проспекта Ленина – на огороженной, покрытой густой растительностью территории. Карта смещений, полученная по методу *Step*, позволяет оценить смещения на всей территории города и его южных окраинах.

07.21-08.12
2022 std



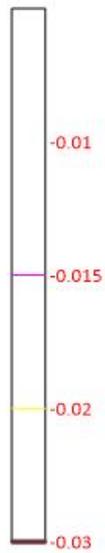
A

07.21-08.12
2022 step



Б

29.05 -07.05
2021
std



В

29.05 -07.05
2021
Step



Г

Рисунок 3.2 – Сравнение работы методов *Std* и *Step* в условиях высокой (А и Б) и низкой (В и Г) когерентности соответственно

3.2 Оценка оседаний на подработанных территориях в районе г. Березники

Рассмотрим результаты, полученные для г. Березники и его окрестностей по спутниковым снимкам 2020-2022 годов. В 2020 году для расчета полей смещений было использовано 18 снимков спутника TerraSAR-X и 13 снимков спутника Sentinel-1В [1]. Смещения рассчитывались методом *Std* через 11 и 22 дня. Смещения за 33 дня определялись путем суммирования результатов за 11 и 22 дня. Смещения за интервалы времени 25.07.2020 – 27.08.2020 г. и 29.09.2020 – 01.11.2020 г. показаны на рисунке 3.3. Согласно спутниковым данным, максимальные смещения произошли на территории провалов 3 и 4 южнее железнодорожного вокзала – на их северо-восточном краю вблизи автодорожного кольца (рисунок 3.3, цифра 1), а также на южном и юго-восточном борту провалов (рисунок 3.3, цифра 2). В обоих случаях, за 33 дня оседания превысили 50 мм (изолиния 50 мм, или 0.05 м, показана желтым цветом).

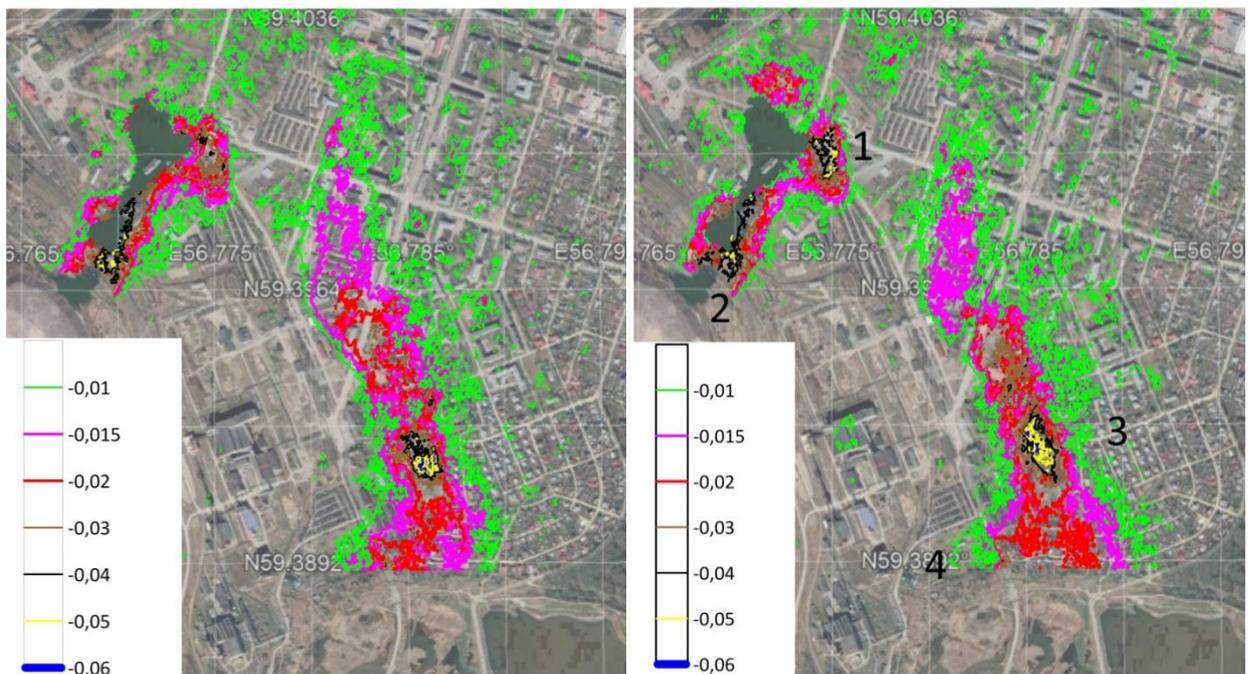


Рисунок 3.3 – Карты субвертикальных смещений области «А» г. Березники, определенных по РСА-снимкам спутника TerraSAR-X за периоды 25.07.2020 г. – 27.08.2020 г. (слева) и 29.09.2020 г. – 01.11.2020 г. (справа). Цифрами 1–4 отмечены области оседаний: провалы 3 и 4 южнее железнодорожного вокзала (1, 2); в центре провала № 5 (3); локальная область оседаний на ул. Котовского (4). Смещения даны в метрах, указанные значения соответствуют оседаниям. Карта совмещена с оптическим спутниковым снимком с сайта <https://www.google.ru/intl/ru/earth/>

Вторая область значительных оседаний находится в центре провала № 5 (рисунок 3.3, цифра 3) – здесь максимальные оседания превзошли 60 мм за 33 дня (изолиния 60 мм, или 0.06 м, показана синим цветом внутри желтой области левее цифры 3). В целом, по изолинии оседаний 15 мм за 33 дня выделяется обширная мульда сдвижений, которая протягивается от ул. Коммунистическая на северо-западе, через ул. Тельмана и проспект Ленина на юго-восток до ул. Котовского. К востоку от области, обозначенной цифрой 3, располагается территория с хорошей когерентностью, где устойчиво фиксируются близкие к нулю смещения. В районе ул. Котовского (рисунок 3.3, восточнее цифры 4) зафиксирована локальная область с оседаниями в 30 мм.

В северо-восточной части рассматриваемой территории, смещения за 33 дня не превосходят 10 мм. Пиксели, в которых обнаружены оседания, в основном приурочены к скверам или располагаются на грунтовых участках между домами. В таких областях рассчитанные смещения менее 10–15 мм находятся на пределе точности парных интерферограмм и должны быть верифицированы в процессе анализа серий снимков или наземными геодезическими измерениями.

При сопоставлении фрагментов на рисунке 3.3 прослеживается устойчивость поля смещений на исследуемой территории в различные периоды 2020 г. Аналогичные величины оседаний получены и за предыдущие периоды, например, в период с 11.06.2020 г. по 14.07.2020 г. Это позволяет заключить, что, несмотря на продолжающееся оседание провалов, меры, принятые для стабилизации процесса оседаний, в целом работают эффективно.

Мониторинг оседаний для области «В» был проведен аналогичным образом. В качестве иллюстрации приводится карта субвертикальных смещений (рисунок 3.4) за период с 25.07.2020 г. по 27.08.2020 г.

В поселках Нартовка, Зырянка и Новая Зырянка, расположенных южнее г. Березники и обозначенных соответственно цифрами 1, 2, 3 на рисунке 3.4, оседания фиксируются вдоль широкой полосы, простирающейся с севера на юг. Оседания за 33 дня в северной части поселков Нартовка и Зырянка достигают 30 мм, местами 40 мм. Далее, на юг, оседания уменьшаются до 15–20 мм. Смещения в низко когерентных лесных массивах и в пойме ручья между поселками Зырянка и Новая Зырянка (рисунок 3.4) оценить не удастся.

Парные интерферограммы позволяют выполнять мониторинг процесса оседаний с небольшой задержкой по времени. Полученные результаты хорошо согласуются с наземными геодезическими измерениями, сопоставление с которыми будет рассмотрено ниже. Отметим, что спутниковый мониторинг позволяет рассчитывать поля смещений по мере получения радарных снимков (через 11 дней для спутников TerraSAR-X), при этом снимки покрывают обширные территории. Благодаря этому, данные РСА-интерферометрии являются важным дополнением к

наземным геодезическим работам, проводимым по сети реперов или вдоль профилей с высокой точностью, но, обычно, не чаще двух-трех раз в год.

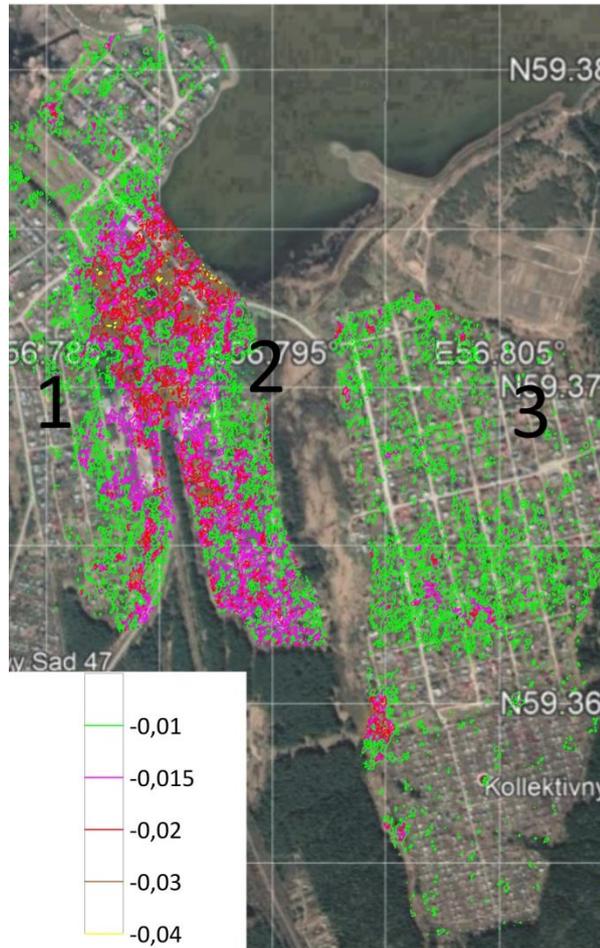


Рисунок 3.4 – Карта субвертикальных смещений области «В», определенных по РСА-снимкам спутника TerraSAR-X за период 25.07.2020 г. – 27.08.2020 г. Показаны территории поселков Нартовка (цифра 1), Зырянка (цифра 2) и Новая Зырянка (цифра 3), расположенных к югу от г. Березники

В тех случаях, когда смещения имеют длительный устойчивый характер, весьма эффективным оказывается суммирование смещений, получаемых по парным интерферограммам [1, 43, 76, 91, 92, 96, 97]. Различного рода помехи (атмосферные эффекты, термический шум, ошибки, связанные с неточным знанием орбит и цифровой модели рельефа) не коррелируют во времени, поскольку зависят от состояния атмосферы, от точности определения орбиты в момент съемки. Отметим, что ошибки, связанные с погрешностями в ЦМР, коррелируют с величиной перпендикулярной базовой линии (длина перпендикуляра, опущенного из точки съемки второго снимка на направление зондирующего луча из точки съемки первого снимка, рисунок 1.2), поэтому эти ошибки также не коррелированы во времени. В результате, суммирование позволяет

эффективно подавлять помехи и выделять полезный сигнал, особенно если его амплитуда со временем увеличивается. Сразу посчитать смещения по паре снимков, выполненных с интервалом по времени в 187 дней, не удастся из-за потери когерентности на больших временных интервалах. Ниже будет приведено сравнение результатов.

Карта субвертикальных смещений для области «А» показанной на рисунке 3.1, полученная по снимкам, выполненным в период с 28.04.2020 г. по 11.11.2020 г., и сопоставленная с данными наземных геодезических измерений, приведена на рисунке 3.5. Видно, что пересчет в субвертикальные смещения дает смещения, близкие к геодезическим данным. Данные РСА-интерферометрии и геодезии согласуются очень хорошо, за исключением северо-западного борта провала (цифра 2 на рисунке 3.5), где область оседаний в 200–250 мм, полученная по данным геодезии несколько сдвинута относительно соответствующей изолинии, построенной по данным РСА-интерферометрии. Эти различия могут быть связаны с тем, что здесь происходят существенные горизонтальные смещения, которыми при вычислении субвертикальных смещений по снимкам с одной орбиты пренебрегают.

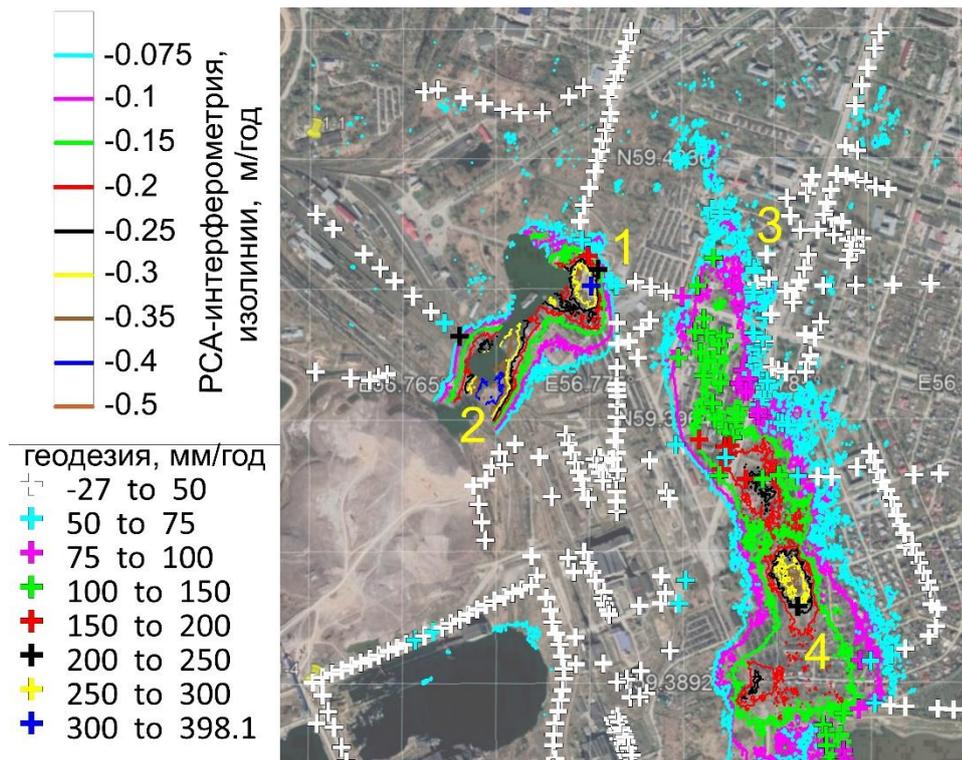


Рисунок 3.5 – Сравнение средних скоростей субвертикальных смещений (изолинии, в м/год) и вертикальных смещений по данным геодезии (символы «+») для области «А» в г. Березники. Средние скорости смещений рассчитаны путем суммирования парных интерферограмм за период 187 дней 2020 г. В геодезических данных оседания положительные и показаны в мм/год

Средние скорости субвертикальных смещений, вычисленные путем суммирования парных интерферограмм за 187 дней, на северо-восточном борту провала в районе автодорожного кольца превосходят 400 мм/год, на юго-восточном борту – 600 мм/год. Южнее, в районе ул. Котовского, средние скорости смещений достигают 300 мм/год, в районе провала № 5– 400 мм/год (положение областей 3 и 4 показано на рисунке 3.3). Эти величины близки к данным геодезии. В центральной части г. Березники оседания до 75 мм/год наблюдаются в основном на природных ландшафтах – на территории парков и скверов и, по-видимому, не связаны с горными работами.

Анализ полей смещений за 187 дней для области «В» позволил выделить две мульды оседаний (рисунок 3.6). Одна из них протягивается от берега Нижнезырянского 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. Оседания за 187 дней на южной окраине этого поселка, которые достигают 150 мм, выявлены в основном на природных ландшафтах и требуют верификации наземными методами.

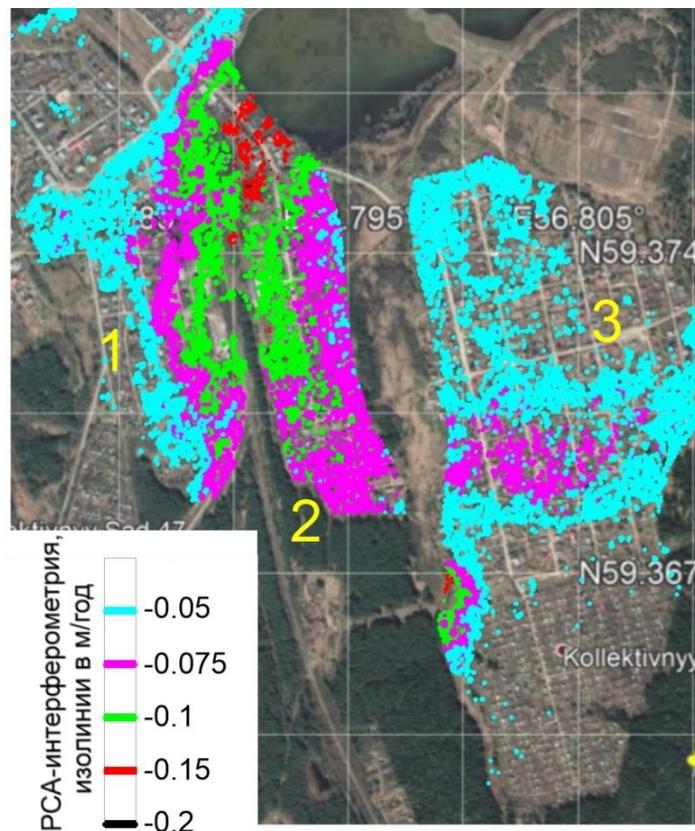


Рисунок 3.6 – Карта средних скоростей субвертикальных оседаний (м/год) области «В», полученная путем суммирования парных интерферограмм, за период 187 дней в 2020 г. Цифрами показаны поселки Нартовка (1), Зырянка (2) и Новая Зырянка (3)

Весной 2021 году мониторинг оседаний г. Березники был нами продолжен. Были использованы снимки со спутника TerraSAR-X, полученные за период с 26 апреля по 8 октября. Планировалось использовать снимки до 30 октября 2021 г., но, по техническим причинам, съемка 19 и 30 октября не была выполнена. Методика расчета повторяла ранее выбранную стратегию – расчет смещений по паре снимков через периоды 11 и 22 дня методом *Step* с верификацией по результатам метода *Std*, суммирование результатов для получения смещений за 33 дня, и итоговое суммирование вычисленных смещений за весь период съемки (165 дней). Три участка области оседания «А» за 33 дня, за период с 25 августа по 27 сентября 2021 г., показаны на рисунках 3.6–3.8. Первый участок карты оседаний в области «А» для ж/д вокзала показан на рисунке 3.6. На северном борту провала, со стороны железнодорожного вокзала, за период 33 дня, оседания составили 25 мм. На противоположном, южном борту, оседания за 33 дня оценены в 35 мм.

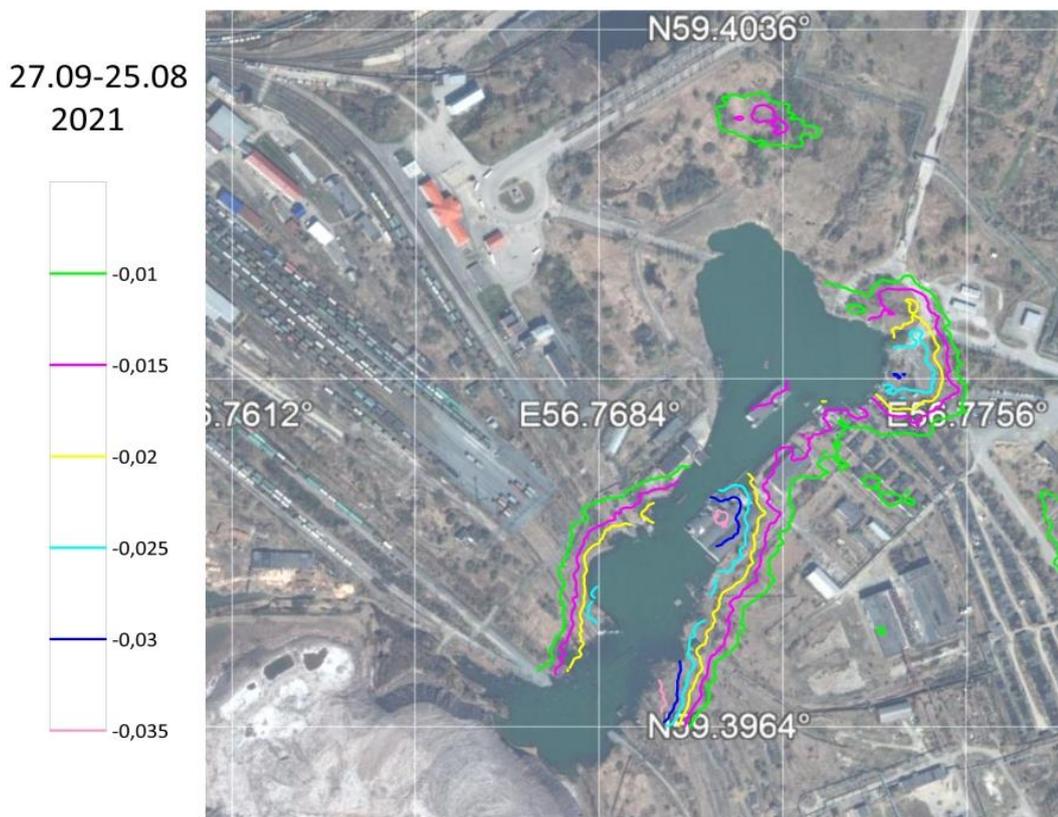


Рисунок 3.6 – Оседания в районе провала у железнодорожного вокзала г. Березники (в метрах) по снимкам спутника TerraSAR-X за период в 33 дня с 25 августа по 27 сентября 2021 г.

Второй участок карты оседаний в области «А» показан на рисунке 3.7. Он расположен в районе ул. Котовского и т.н. Панели переходного периода (территория в г. Березники, размерами примерно 800 на 800 метров, ограниченная пл. Решетова, ул. Котовского, ул. Гастелло, см. рисунок 3.1). Максимальные оседания в этом районе зафиксированы на грунтовой площадке севернее дома 1А по проспекту Ленина. Они достигают 50 мм за 33 дня с тенденцией к

увеличению в осенний период мониторинга. Южнее выделяются две мульды с величиной оседания до 30 мм за 33 дня.

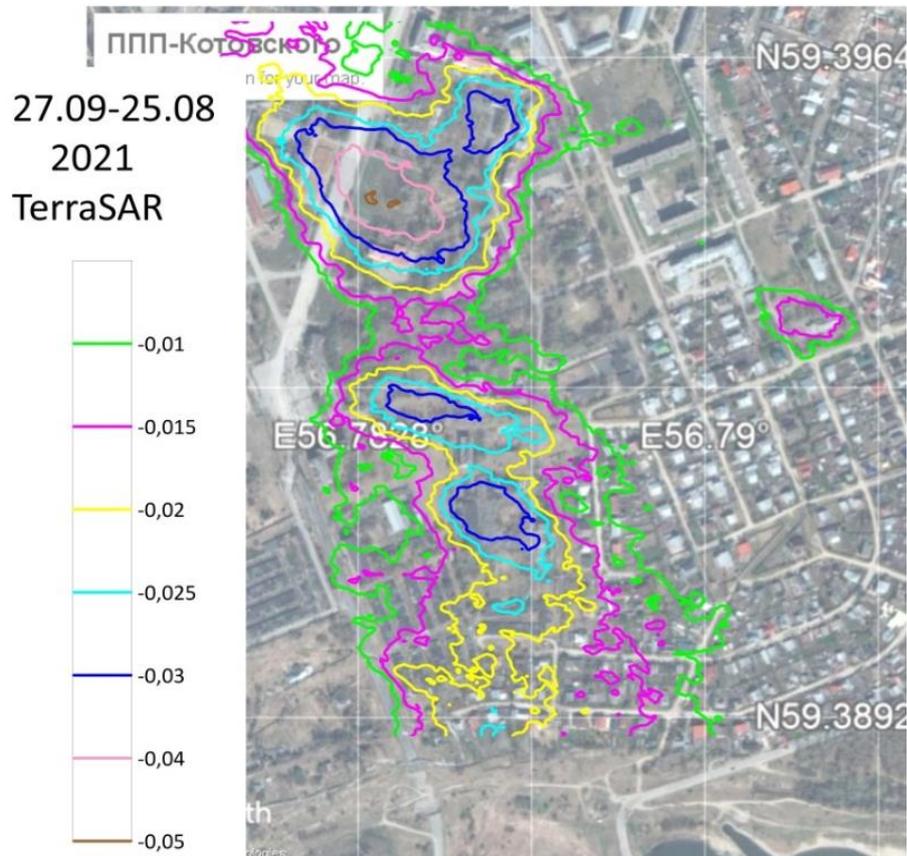


Рисунок 3.7 – Оседания в районе провала в районе ул. Котовского – Панели переходного периода в г. Березники (в долях метра) по снимкам спутника TerraSAR-X за период с 25 августа по 27 сентября 2021 г.

Третий участок карты оседаний в области «А», в районе проспекта Ленина – ул. Тельмана, показан на рисунке 3.8. На северо-западной стороне проспекта Ленина, в его начале, в треугольнике, образованном проспектом Ленина, ул. Тельмана на севере и ул. Максима Горького на юго-западе, за период в 33 дня, появляются отдельные небольшие области с погружением в 20–25 мм. Основными здесь являются оседания на грунтовой площадке от д. 1А до домов 12 и 12А по юго-восточной стороне проспекта Ленина, о чем было сказано выше.

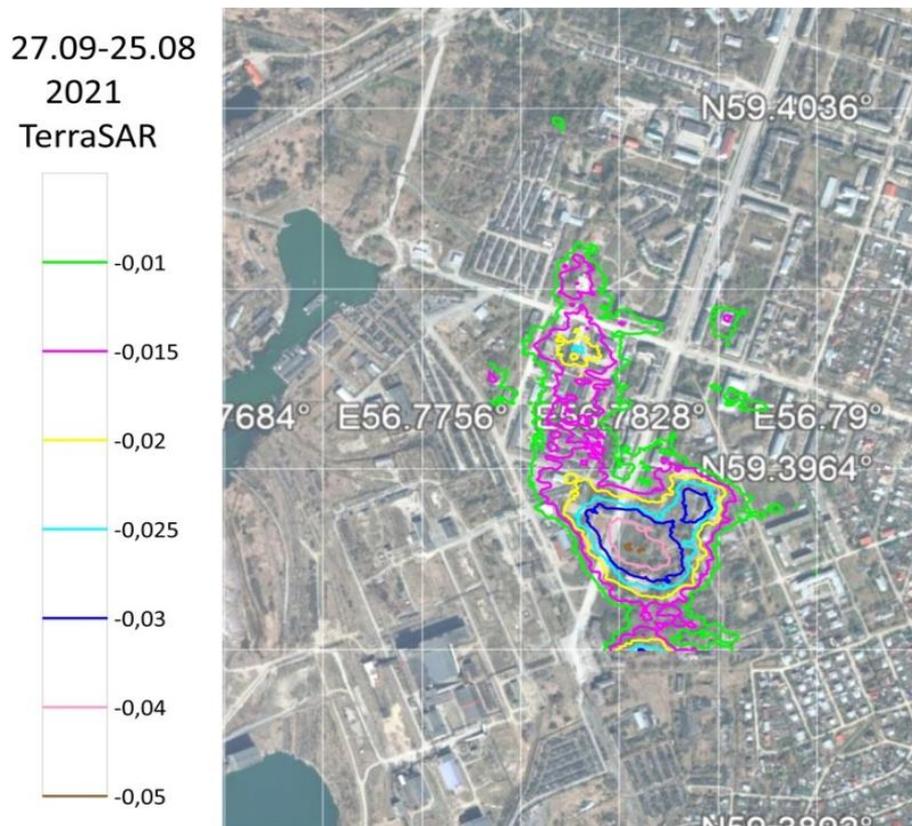


Рисунок 3.8 – Оседания в районе проспекта Ленина – ул. Тельмана в г. Березники (в долях метра) по снимкам спутника TerraSAR-X за период с 25 августа по 27 сентября 2021 г.

Оседания в области «В» (поселки Нартовка, Зырянка и Новая Зырянка) демонстрирует рисунок 3.9. Основная область оседаний в этом районе в 2021 г. расположена на берегу Нижнезырянского водохранилища и на расположенных западнее участках пос. Зырянка. На берегу водохранилища, севернее поселка Зырянка, максимальные смещения за 33 дня составили 10–15 мм, западнее – выделяется локальная область оседаний в 30 мм. В южной части пос. Зырянка также выявляются отдельные области оседаний, достигающих 15 мм за 33 дня.

В получаемых полях смещений постоянно выявляются оседания вдоль дороги, идущей между поселками Нартовка и Зырянка. И в исследуемый период здесь выявлены области оседаний до 20 мм за 33 дня. Дорога окружена полосами деревьев, вдоль нее расположено немного объектов, хорошо отражающих радарный сигнал, что затрудняет оценку смещений. Еще одна область оседаний, вытянутая с запада на восток в средней части поселка Новая Зырянка, на интервале времени в 33 дня проявилась отдельными областями с величинами оседаний в 10–15 мм.

27.09-25.08
2021
TerraSAR

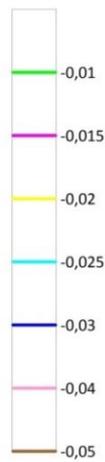


Рисунок 3.9 – Оседания в области «В» в г. Березники (в долях метра) по снимкам спутника TerraSAR-X за период с 25 августа по 27 сентября 2021 г.

Перейдем к анализу полученных суммарных смещений за 165 дней 2021 года. На рисунке 3.10 показана карта средних скоростей оседаний для области «А», размерность шкалы соответствует метрам в год. В целом, как и в 2020 году, на карте смещений четко выявляются две мульды оседаний: вокруг провала в районе промплощадки БКПРУ и от улицы Котовского на юге до улицы Тельмана на севере.

08.10-26.04
TerraSAR
m/year

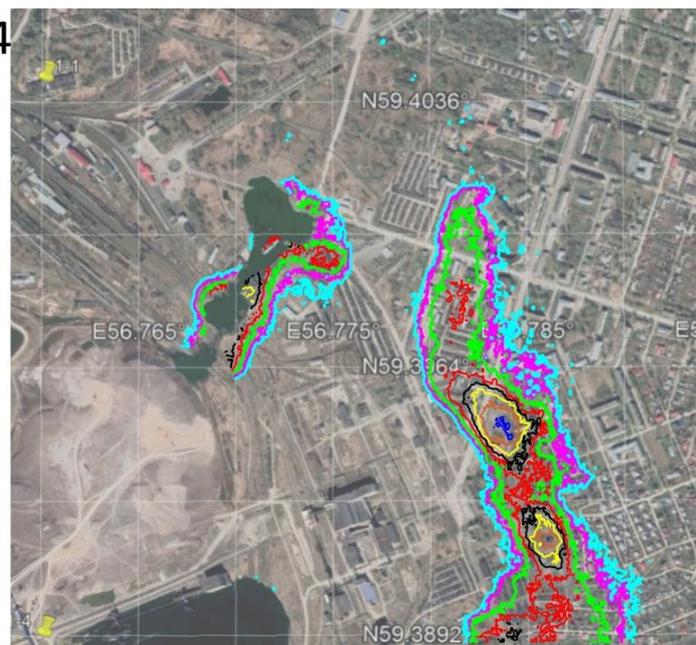
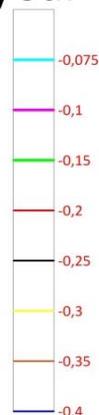


Рисунок 3.10 – Карта средних скоростей оседаний (в м/год) для области «А» за период 165 дней в 2021 году в г. Березники

Средние скорости смещений по данным за 165 дней на северо-восточном борту провала (рисунок 3.10), в районе автодорожного кольца достигают 200 мм/год. На южном борту – оседания имеют среднюю скорость более 300 мм/год. На южном борту провала, ближе к солеотвалам, оценки полей смещений не проводились из-за больших градиентов поля смещений. В южной части области «А» (район улицы Котовского – Панель переходного периода), скорости оседаний достигают 250 мм/год в районе ул. Котовского. Далее на север от ул. Котовского, по изолинии 200 мм/год (показана красным цветом), выделяется обширная мульда оседаний, которая протягивается до проспекта Ленина и пересекает его в районе снесенных домов 1-3. В пределах этой мульды выделяются две области сдвижения. В первой области – с центром южнее разрушенной школы на ул. Калийная, получена средняя скорость оседаний немногим более 350 мм/год, что близко к оценкам 2020 года. Вторая область занимает незастроенную площадку вдоль проспекта Ленина от дома 1А до домов 12 и 12А. Средняя скорость оседания здесь превосходит 400 мм/год, что примерно на 1/4 больше средней скорости оседаний в 2020 году (300 мм/год). Эти две мульды разделяет область, в которой оседания составляют около 200 мм/год.

На другой стороне проспекта Ленина, в квартале, ограниченном с севера улицей Тельмана, оседания за период 165 дней шли со средней скоростью 150 мм/год, на отдельных участках – до 200 мм/год. Вне перечисленных зон в области «А» заметных оседаний не зафиксировано.

В области «В», как и в 2020 году, выделяется две мульды оседаний (рисунок 3.11). Первая область оседаний протягивается примерно с севера на юг от Нижнезырянского водохранилища по территории поселков Нартовка и Зырянка. Область максимальных оседаний (более 150 мм за 165 дней) начинается от водохранилища, протягивается на юг, занимая северную часть поселка Зырянка и часть поселка Нартовка. На берегу водоема средние скорости оседания достигают 250 мм/год, далее на юг оседания уменьшаются и в полосе железной дороги между поселками Нартовка и Зырянка составляют 150 мм/год.

Вторая область менее интенсивных оседаний (до 100 мм/год) протягивается с запада на восток в средней части поселка Новая Зырянка. Возможно, на западе, эта область соединяется с областью оседаний в южной части поселка Зырянка. Еще южнее располагается небольшая область оседаний со средней скоростью 100 мм/год. Эта область зафиксирована на юго-западной окраине поселка Новая Зырянка частично на природных ландшафтах. Проследить ее продолжение на запад не удастся, поскольку западнее располагается лесной массив.

В целом положение областей оседания и величина смещений в 2020 и в 2021 гг. хорошо согласуются, включая небольшую область оседаний на юго-западной окраине поселка Новая Зырянка со средней скоростью 100 мм/год.

08.10-26.04
TerraSAR
m/year

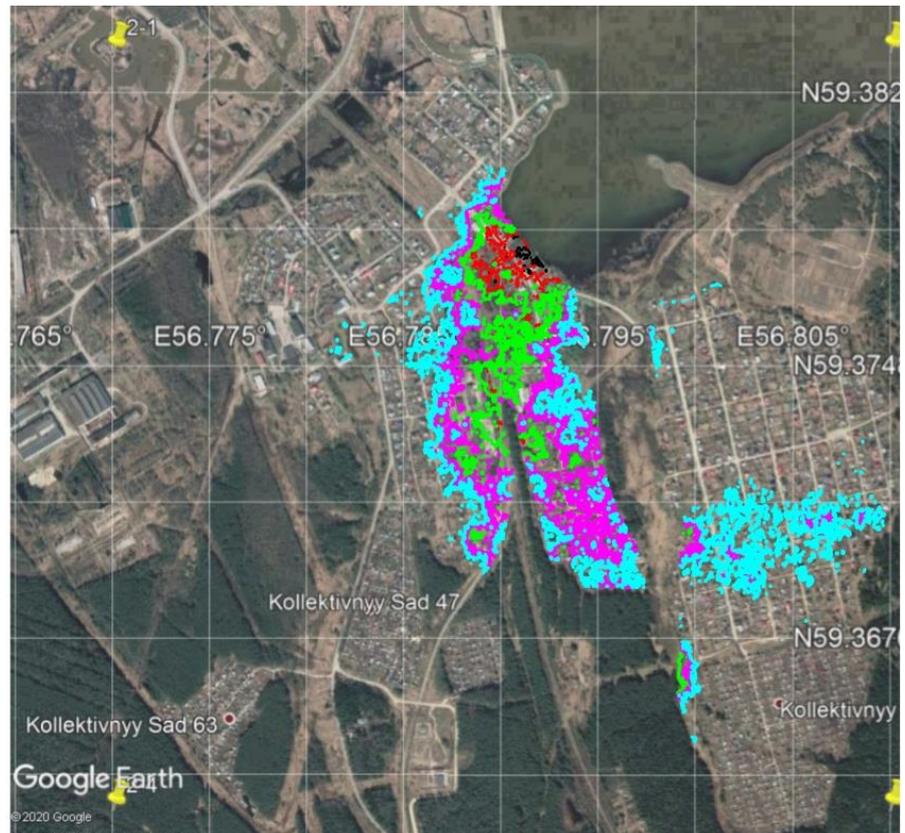
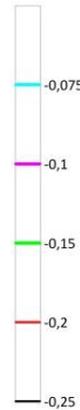


Рисунок 3.11 – Карта средних скоростей оседаний (в м/год) для области «В» за период 165 дней в 2021 году в г. Березники

В 2022 году был продолжен мониторинг оседаний г. Березники: в период с 24 апреля по 17 октября было получено 17 спутниковых снимков спутника TerraSAR-X. Методика расчета по паре снимков повторяла ранее выбранную стратегию – вычисление смещений методом *Step* через периоды 11 и 22 дня, верификация результатов, полученных методом *Std* для когерентных областей, суммирование результатов для получения интервалов за 33 дня (при необходимости), и итоговое суммирование вычисленных смещений за весь период съемки (176 дней).

На основе анализа смещений за 22 дня в течение периода съемки сделаны следующие выводы.

Для области «А»: в среднем, оседания у автодорожного кольца составляли около 10 мм, на берегах провала 3-4 в его центральной части – оседания около 20–25 мм.

В районе снесенного д. 3 по проспекту Ленина, оседания устойчивы и равны 20 мм за 22 дня. На грунтовой площадке севернее дома 1А по проспекту Ленина они в среднем составляли 25 мм.

Южнее Калийной улицы, оседания удастся оценить не по всем интерферограммам, но, например, в период с 21.07.2022 г. по 12.08.2022 г. или с 25.09.2022 г. по 17.10.2022 г. они достигали 25 мм.

Для области «В» по спутниковым данным выявляются оседания до 20 мм за 22 дня на берегу Нижнезырянского водохранилища, в районе отселенных домов. Несколько южнее, на перекрестке улиц Железнодорожная и Шолохова (юго-западная оконечность Нижнезырянского водохранилища), смещения временами увеличиваются до 20–25 мм. Оседания также обнаружены в южной части пос. Нартовка и между поселками Нартовка и Зырянка. Часть областей оседания, которые фиксируются на природных ландшафтах, обнаруживаются не на всех парных интерферограммах. На большей части области «В» смещения определяются, и они близки к нулю.

Для оценки устойчивых оседаний было выполнено суммирование парных интерферограмм за период в 176 дней: с 24 апреля по 17 октября 2022 г. Полученные значения показаны в значениях м/год на рисунках 3.12 и 3.13.

На рисунке 3.12 приведены средние скорости смещений в м/год за период с 24.04.2022 г. по 17.10.2022 г. В 2022 году скорости оседаний вокруг провала 3–4 на южном и северном бортах местами достигают 0.2 м/год, на автодорожном кольце скорость оседания составила 0.1 м/год, а немного южнее кольца средняя скорость оседаний увеличилась до 0.15–0.2 м/год.

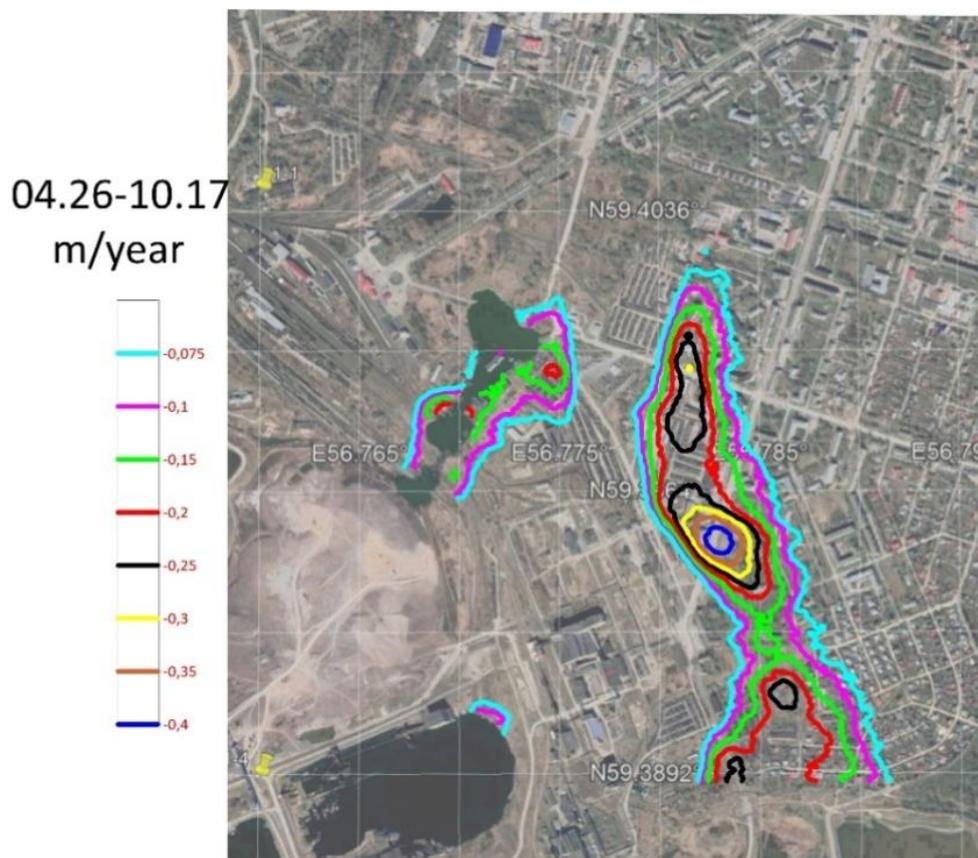


Рисунок 3.12. Средние скорости оседаний в области «А» в м/год, полученные путем суммирования смещений, рассчитанных по парным интерферограммам за период с 24.04.2022 г. по 17.10.2022 г. (за 176 дней)

Обширная область оседаний со средней скоростью 0.25 м/год протягивается от ул. Тельмана на юг, к началу проспекта Ленина, где в районе снесенного д. 3 оседания увеличиваются до 0.4 м/год. Далее на юг, южнее Калийной улицы, располагается обширная область оседаний со скоростью более 0.2 м/год. Внутри этой области фиксируются оседания со скоростью немногим более 0.25 м/год – в районе провала, южнее разрушенной школы, и в районе мульды оседаний у домов 31–33 по ул. Котовского.

Сравнение результатов 2022 г. со средними скоростями смещений, определенными по 16-ти спутниковым снимкам за 2021 г., полученным за период с конца апреля по начало октября (рисунок 3.10) показывает, что поля оседаний очень близки. В 2021 году немного бóльшие оседания получены на южном борту провалов 3 и 4. Южнее Калийной улицы оседания в 2021 г. оценены в 350–400 мм/год против 250 мм/год в 2022 г. В 2022 году несколько увеличилась скорость оседаний в районе ул. Тельмана и далее на юг, к проспекту Ленина.

На рисунке 3.13 приведены карты средней скорости смещений для области «В» за тот же период (176 дней), полученные путем суммирования полей смещений за последовательные периоды в 22 дня. На рисунке 3.11 были приведены аналогичные данные, полученные по снимкам 2021 года за период в 165 дней.

В целом эти карты близки, хотя оседания в 2022 г. оказались немного меньше. Максимальные оседания происходят на берегу Нижнезырянского водохранилища и составляют в северной части берега, в огражденной зоне, до 0.15–0.2 м/год. На южной части берега оседания увеличиваются до 0.225 м/год. Область оседания со средней скоростью 0.15 м/год протягивается несколько южнее перекрестка улиц Железнодорожной и Шолохова (юго-западная оконечность Нижнезырянского водохранилища). В остальной части поселков Нартовка и Зырянка – оседания невелики. Только на границе этих поселков, на природных ландшафтах, оседания достигают 0.1 м/год. В средней части поселка Новая Зырянка, как и в прошлые годы, фиксируется область небольших оседаний широтного простирания. Оседания здесь уменьшились по сравнению с 2021 г. и составляют не более 0.075 м/год. Также немного уменьшилась величина оседаний на юго-западной окраине пос. Новая Зырянка, со 100-150 мм/год в 2020 и 2021 гг., до 75 мм/год в 2022 г.

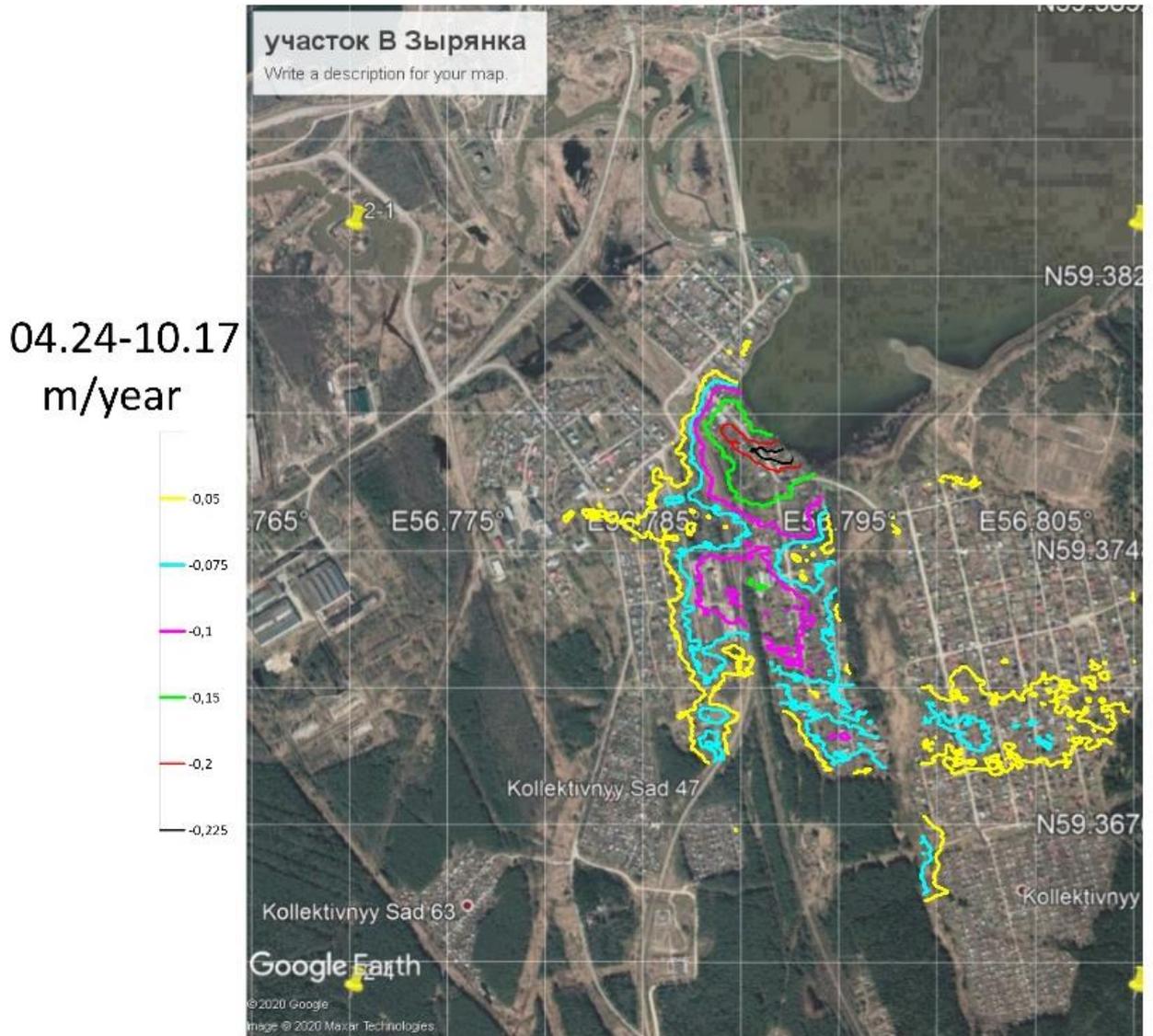


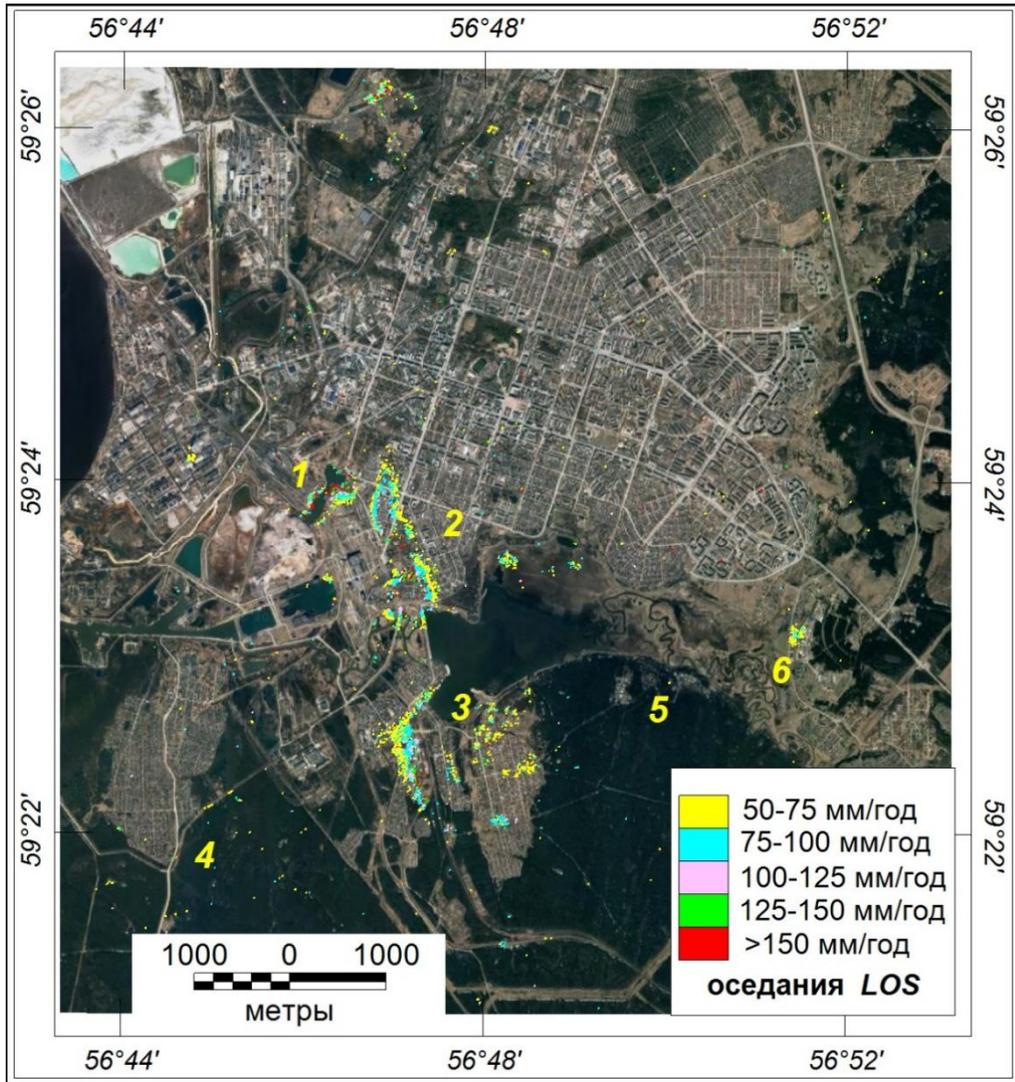
Рисунок 3.13 – Средние скорости оседаний в области «В», в м/год, полученные путем суммирования смещений, рассчитанных по парным интерферограммам за период с 24.04.2022 г. по 17.10.2022 г. (за 176 дней)

Проведенный анализ показывает, что спутниковая РСА-интерферометрия, с применением разработанных в диссертационной работе технологий обработки, позволяет получать детальные карты смещений на подработанных территориях в г. Березники и его окрестностях. Области оседаний и величины оседаний стабильны, что позволяет заключить, что, несмотря на продолжающееся оседание провалов, меры, принятые для стабилизации процесса оседаний, в целом работают эффективно.

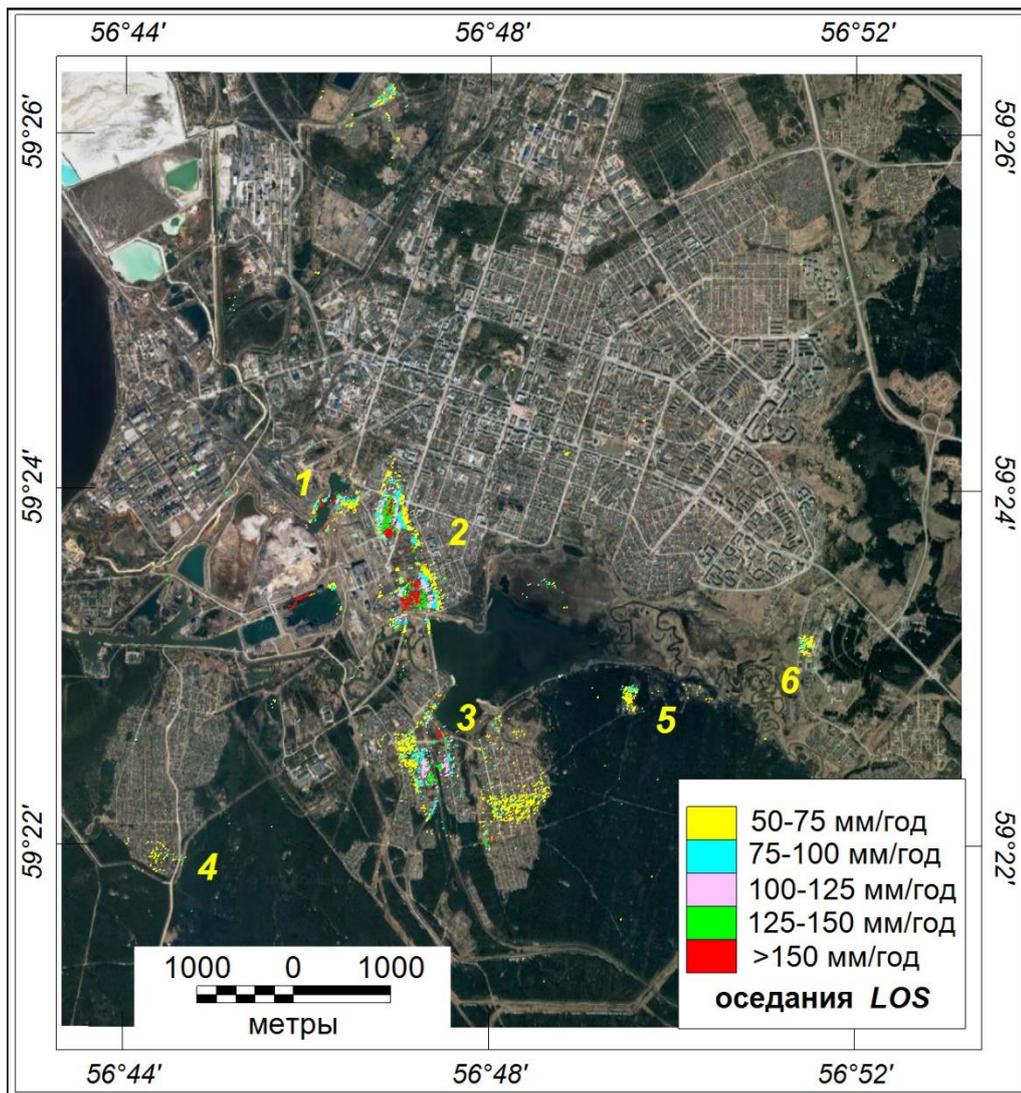
3.3 Анализ полей смещений методом устойчивых отражателей

Как было показано в главе 1, результатом обработки двух спутниковых снимков является разность фаз, содержащая в себе 5 компонент (формула 1.2). Точность расчета зависит в том числе и от эффективного подавления помех, маскирующих деформационный сигнал. Метод DInSAR во многих случаях способен выделить полезный сигнал на фоне атмосферных возмущений и при тщательной обработке снимков дает устойчивые оценки смещений. Альтернативой являются рассмотренные в главе 1 методы устойчивых отражателей (SBaS, PSInSAR, IPTA, StaMPS-MTI и мн. др.), которые позволяют: 1) рассчитывать вклад атмосферной компоненты и удалять его из дифференциальной интерферограммы; 2) итеративно улучшать расчеты путем коррекции ЦМР, атмосферной фазы, модели деформаций, что позволяет корректировать скорость смещений и расширять список точек-кандидатов в устойчивые отражатели; 3) строить временные ряды смещений для каждого устойчивого отражателя.

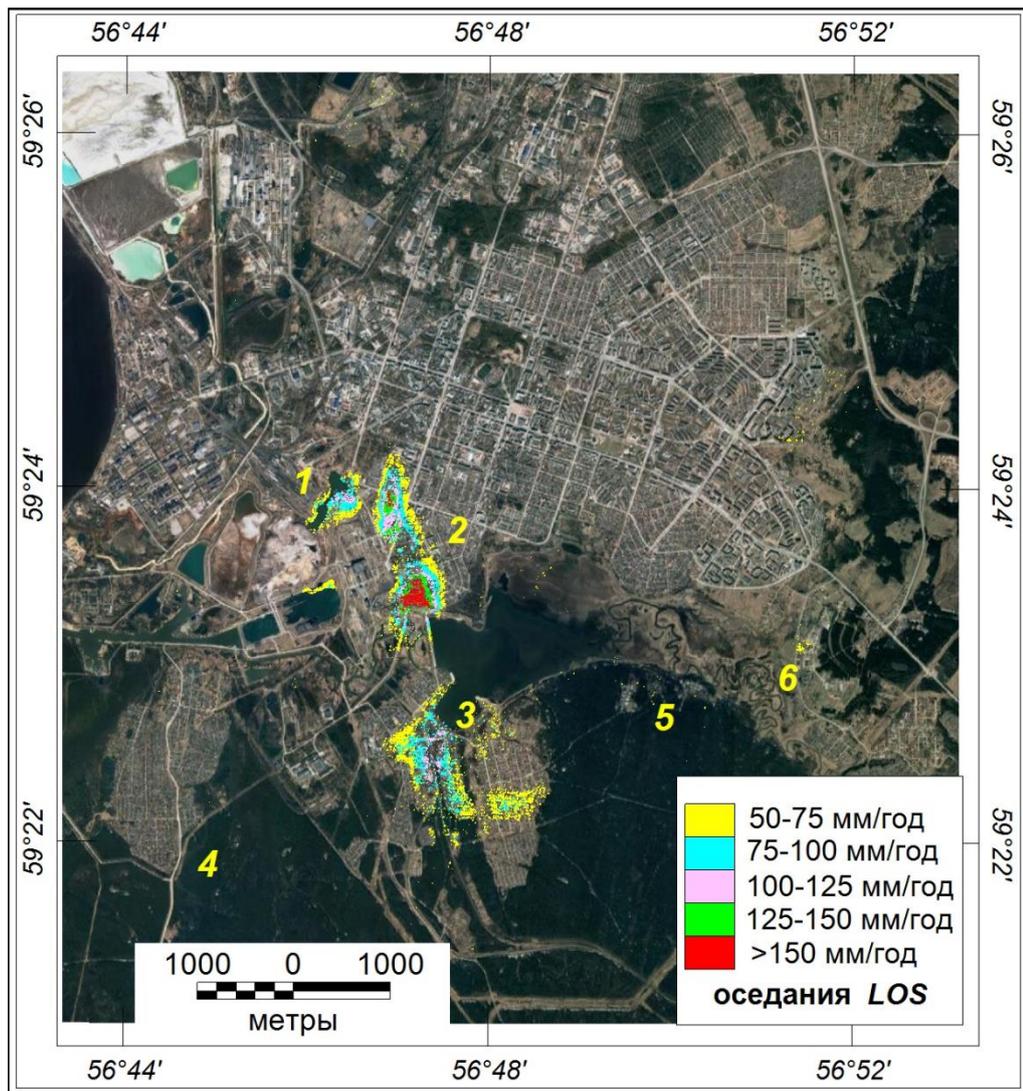
По снимкам спутника TerraSAR-X с применением методов IPTA и SBAS (в 2022 г.) были получены карты смещений в направлении на спутник (*LOS*) для периода съемки в 2020-2022 гг., они представлены на рисунке 3.14. Цифрами показаны: 1 – провал южнее ж/д вокзала; 2 – Панель переходного периода; 3 – поселки Нартовка, Зырянка и Новая Зырянка; 4 – поселок им. Чкалова, 5 – базы отдыха на южном берегу водохранилища, 6 – агрофирма Суханово. Все карты визуализированы в единой палитре.



A



Б



В

Рисунок 3.14 – Карты смещений (*LOS*) земной поверхности в г. Березники, полученные методом устойчивых отражателей в 2020 (А), 2021 (Б) и 2022 (В) годах

Оценивая полученные результаты за 3 года, отметим, что существенно менялась только скорость оседаний на юге поселка в нижнем левом углу снимка (цифра 4 на рисунке 3.14). В 2020 году смещения здесь были незначительными, в 2021 году заметно ускорились, а в 2022 году снова замедлились. Временной ряд смещений показывает здесь непостоянные во времени скачкообразные оседания. Эту область интересно исследовать по снимкам последующих лет.

Перейдем от рассчитанных смещений *LOS* к субвертикальным, в предположении, что горизонтальные смещения существенно меньше вертикальных. На рисунке 3.15 приведены детальные карты оседаний для области «А» за 2020 и 2021 гг.

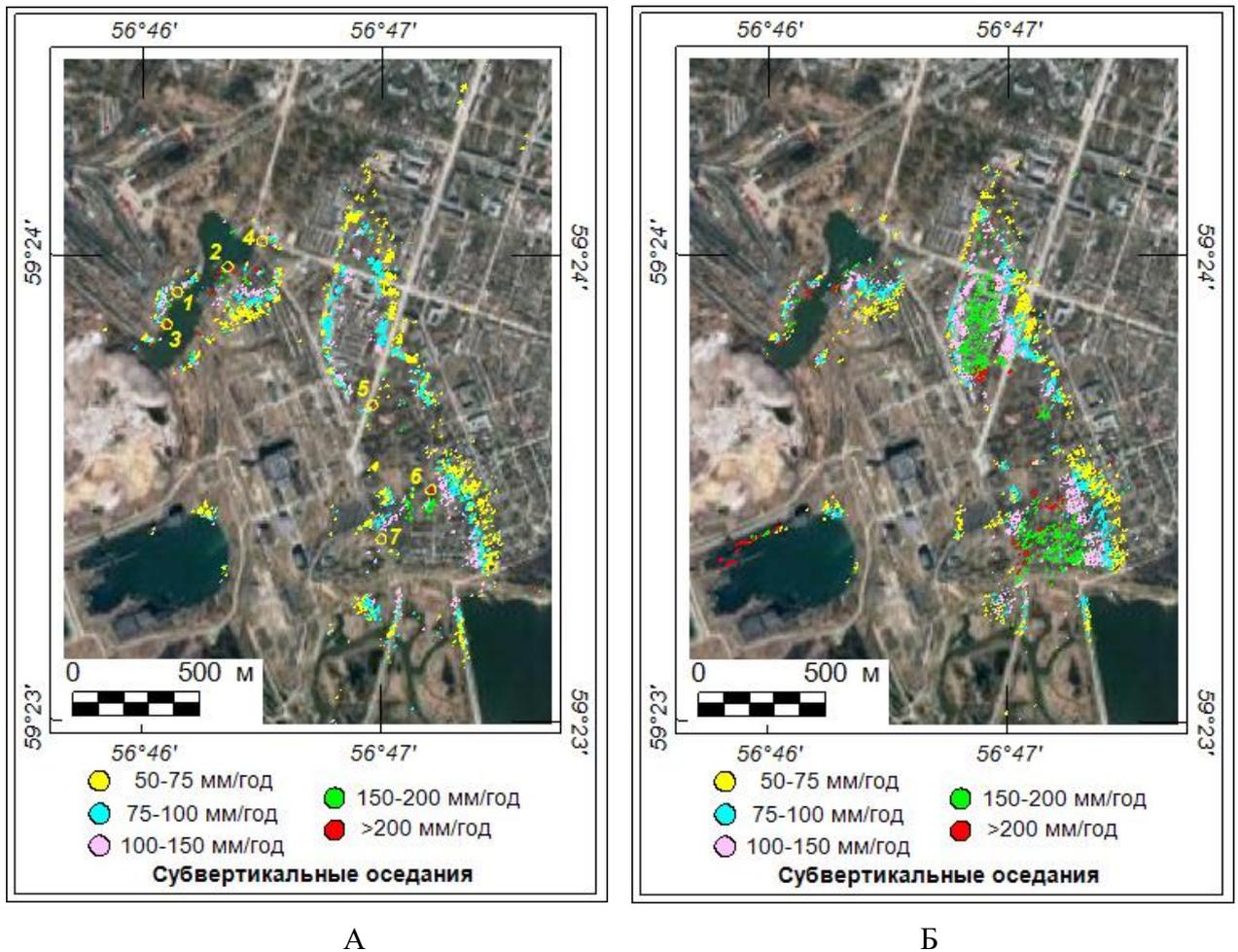


Рисунок 3.15 – Средние скорости оседаний устойчиво отражающих объектов (в мм/год) для области «А» г. Березники, вычисленные методом устойчивых отражателей [2, 33]. А – результат, полученный по снимкам 2020 г.; Б – по снимкам 2021 г. Цифрами 1–7 на рисунке А показаны устойчивые отражатели, для которых построены временные ряды (см. ниже)

Смещения у ж/д вокзала и автодорожного кольца (цифры 1-4 на рисунке 3.15 А): вокруг провала скорости оседаний в 2020 году достигают 255 мм/год, при этом в 2020 году такие оседания фиксируются по всей периферии провала, а в 2021 году – только на его северном берегу. В 2022 году в этой области максимальные смещения уменьшились до 150 мм/год.

К северу от проспекта Ленина располагается область, скорость оседаний в которой в 2021 году достигала 200 мм/год, а в отдельных точках – 230 мм/год. По снимкам за 2020 год в этой области идентифицировано заметно меньше устойчивых отражателей, но там, где их удалось идентифицировать, средние скорости в 2020 году оказываются ниже, чем в 2021 году (200 мм/год в точке 5 на рисунке 3.15 А). В 2022 году в локальной области около дома 3 по ул. Тельмана оседания также достигают скорости 180 мм/год, и уменьшаются до 50 мм/год к периферии. В области максимальных оседаний в начале проспекта Ленина, получить оценки смещений методами устойчивых отражателей не удалось.

Далее на юг, между улицами Калийная и Котовского, в 2021 году фиксируются оседания более 240 мм/год. В 2020 году здесь удалось идентифицировать существенно меньше устойчиво отражающих объектов, скорость погружения достигает 215 мм/год, в 2022 году – до 180 мм/год, отдельные пиксели – до 200 мм/год.

В поселках Нартовка, Зырянка и Новая Зырянка выделяются две полосы оседаний. Первая протягивается примерно с севера на юг, вдоль границы поселков Нартовка и Зырянка. Средние скорости оседаний здесь достигают 100 – 135 мм/год, локально – до 170 мм/год (2020, 2022 годы). В 2021 году отмечается ускорение до 160 мм/год, локально – до 220 мм/год – на берегу Нижнезырянского водохранилища в районе отселенных домов на Железнодорожной улице. Скорость смещений в этой области последовательно возрастала: до 140 мм/год в 2020 году и до 200 мм/год в 2021 году.

Вторая область умеренных оседаний протягивается с запада на восток в средней части поселка Новая Зырянка и частично захватывает южные окраины пос. Зырянка и Нартовка. Оседания здесь в 2022 году оценены в 70 мм/год, местами до 100 мм/год. Исходя из трехлетнего мониторинга этой территории, оседания в целом замедляются (120 мм/год в 2020-2021 годах). Из общей картины оседаний (рис. 3.14) следует, что, возможно, эта зона протягивается на восток, через область умеренных оседаний на территории базы отдыха «Строитель» к агрофирме «Суханово» (цифры 5 и 6 на рисунке 3.14). Оседания здесь не превосходят 50 мм/год, местами 70 мм/год (2022 год) – такая же скорость отмечена и в предыдущие годы мониторинга.

Результаты этого раздела показывают, что метод суммирования интерферограмм, рассчитанных по методу *Step*, дает для территории г. Березники и прилегающих районов детальную карту оседаний, более равномерно покрывающую область исследований. Методы устойчивых отражателей позволяют оценивать смещения в отдельных, не связанных между собой, областях. В целом, оценки, полученные при различных подходах, хорошо согласуются.

3.4 Площадной мониторинг оседаний земной поверхности в пределах подработанной территории г. Соликамск (рудник СКРУ-2)

В 2021 году нами был начат мониторинг области южнее г. Соликамск, который расположен над подработанной территорией рудника калийных и магниевых солей СКРУ-2 (рисунок 3.16). По аналогии с мониторингом территории г. Березники, в течение всего бесснежного сезона, с интервалом через 11 дней, анализировались снимки спутника TerraSAR-X, оперативно проводился мониторинг оседаний – рассчитывались карты смещений методами *Std* и *Step* с интервалом через 22 дня. В результате получено два набора интерферограмм: с 26 апреля по 27 сентября и с 7 мая по 8 октября 2021 г. Эти интерферограммы были

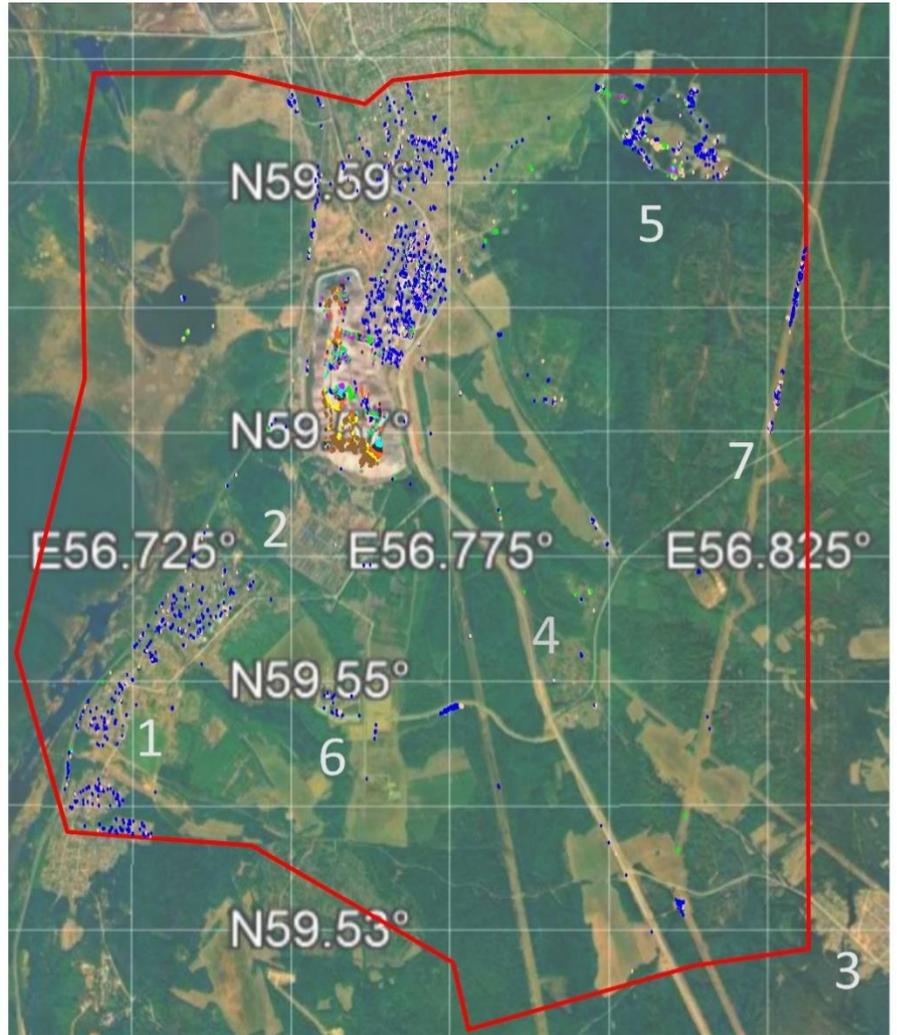
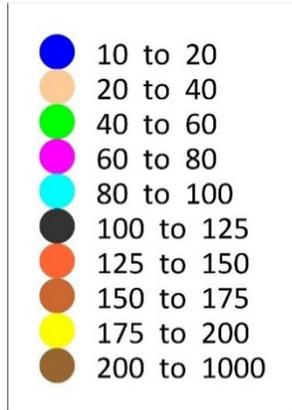
просуммированы для устранения смещений, которые проявлялись на парных интерферограммах неустойчиво.



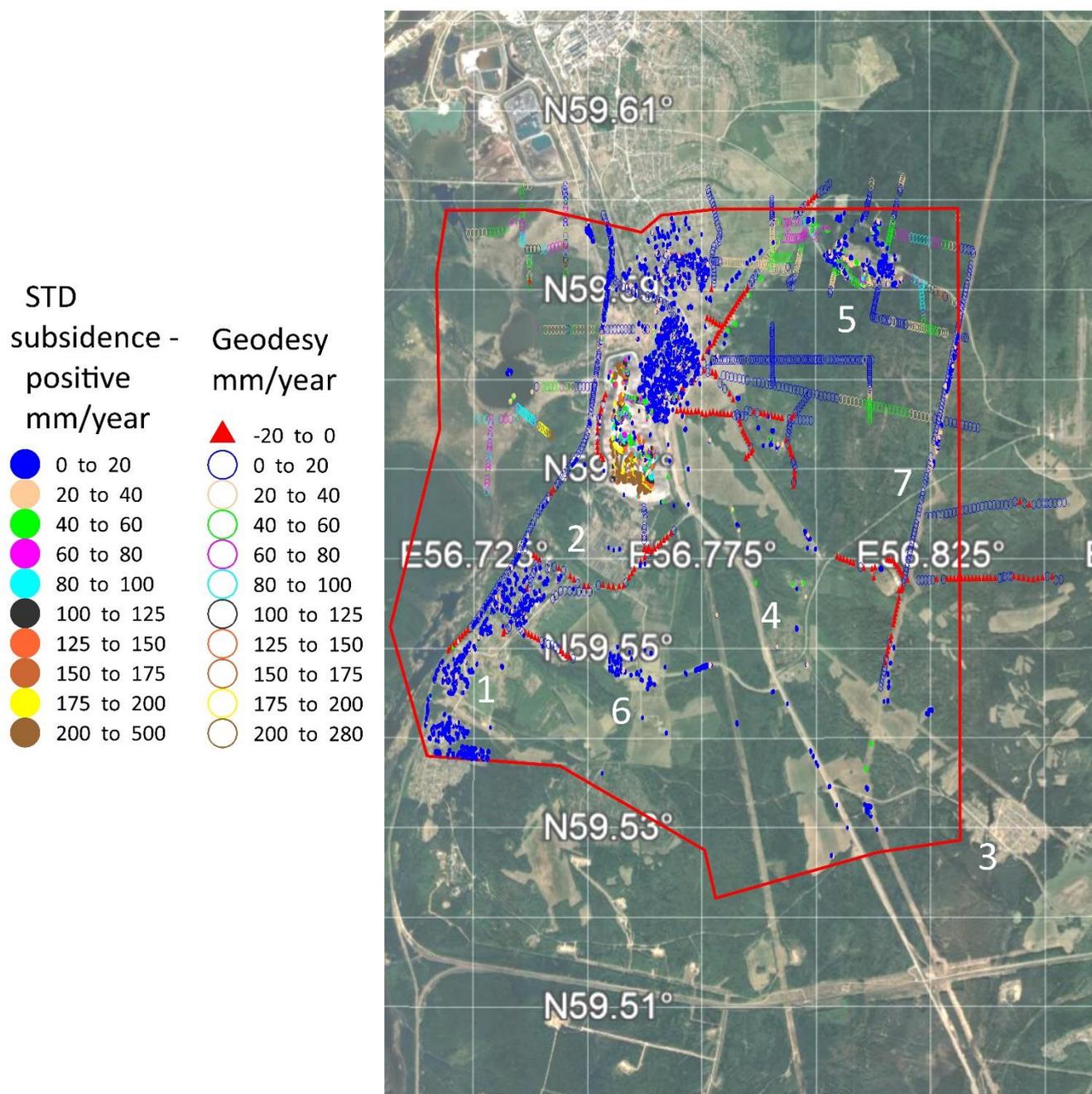
Рисунок 3.16 – Карта горного отвода СКРУ-2 южнее г. Соликамска. 1 – пос. Родники; 2 – Родниковская птицефабрика; 3 – пос. Усовский; 4 – сад Магний; 5 – провал; 6 – новый ствол СКРУ-2; 7 – газопровод. Фиолетовый контур – горный отвод СКРУ. Карта города взята с интернет-сайта <http://OpenStreetMap.org>

Далее полученные суммарные смещения за 165 дней были пересчитаны в скорости смещений в мм/год. Смещения величиной менее 10 мм на суммарных интерферограммах являются малыми по сравнению с уровнем помех. Этим смещениям соответствует средняя скорость субвертикальных смещений 22 мм/год, поэтому скорости смещений анализировались начиная со значения 20 мм/год. Метод *Std* позволил получить значения оседаний для более чем 82 тыс. элементов разрешения (пикселей). Из них в пределах от -20 до 20 мм/год находятся более 52 тыс. значений. Более интенсивные оседания зафиксированы методом *Std* в области провала (рисунок 3.17, цифра 5) на северо-востоке области, на солеотвале и в центре новой промышленной площадки СКРУ-2 (рисунок 3.17, цифра 6), южнее солеотвала.

STD
subsidence -
positive
mm/year



A



Б

Рисунок 3.17 – Средние скорости оседаний, рассчитанные по методу *Std* по снимкам за период 165 дней 2021 г. (А) и их сравнение по данным повторных нивелировок (Б). 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>

Смещения в районе Родниковской птицефабрики (рисунок 3.17, цифра 2) близки к нулю, что совпадает с данными нивелировок. Смещения в области нового ствола СКРУ-2 (рисунок 3.17 А, цифра б) также невелики. Смещения на дороге восточнее нового ствола близки к нулю. На

южной окраине г. Соликамска, в поселке Рубцово, как и в поселке Родники, 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 солеотвале, в его южной части, оседания достигают 200 мм/год, 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.

Вдоль газопровода (рисунок 3.17, цифра 7) смещения близки к нулю. На фоне нулевых смещений выделяются небольшие участки со смещениями до 40 мм/год, которые также вряд ли связаны с подземными работами. Южнее, вдоль газопровода, также получены смещения, близкие к нулю. Севернее сада Магний (рисунок 3.17, 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 (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. Смещения именно в этих областях и фиксирует РСА-интерферометрия. Нивелировки проводятся по системам реперов, расположенных вне зоны наземных работ. Поэтому, непосредственно сопоставлять измерения на геодезических реперах с оценками смещений на грунтовых площадках – не совсем корректно. Однако отсутствие принципиальных расхождений вне зоны наземных работ указывает на то, что наземная геодезия и РСА-интерферометрия дополняют друг друга.

В 2022 году мониторинг территории г. Соликамск продолжился на основе выбранных ранее методов. По методу *Std* были рассчитаны два набора парных интерферограмм с интервалом в 22 дня: с 24 апреля по 17 октября 2022 г. и с 4 мая по 28 октября 2022 г. Эти интерферограммы были просуммированы для устранения смещений, которые проявлялись на парных интерферограммах неустойчиво. Далее, полученные суммарные смещения за 176 дней были

пересчитаны в скорости смещений в мм/год. Смещения менее 10 мм на суммарных интерферограммах за 176 дней сравнимы с уровнем помех. Этим смещениям соответствует средняя скорость в 20.7 мм/год, поэтому скорости смещений анализировались начиная с величины 20 мм/год.

В целом, метод *Std* позволил получить значения оседаний более чем 57 тыс. элементов разрешения (пикселей). Из них в пределах от -0.02 до 0.02 м/год находится более 27.9 тыс. значений. Существенные смещения зафиксированы методом *Std* в области провала, на солеотвале и в центре промышленной площадки СКРУ-2, в южной части поселка Родники и далее на юг, в поселках Геологоразведка и Чашкина. Для большей информативности, на рисунке 3.18 дана карта оседаний, на которой не показаны малые смещения.

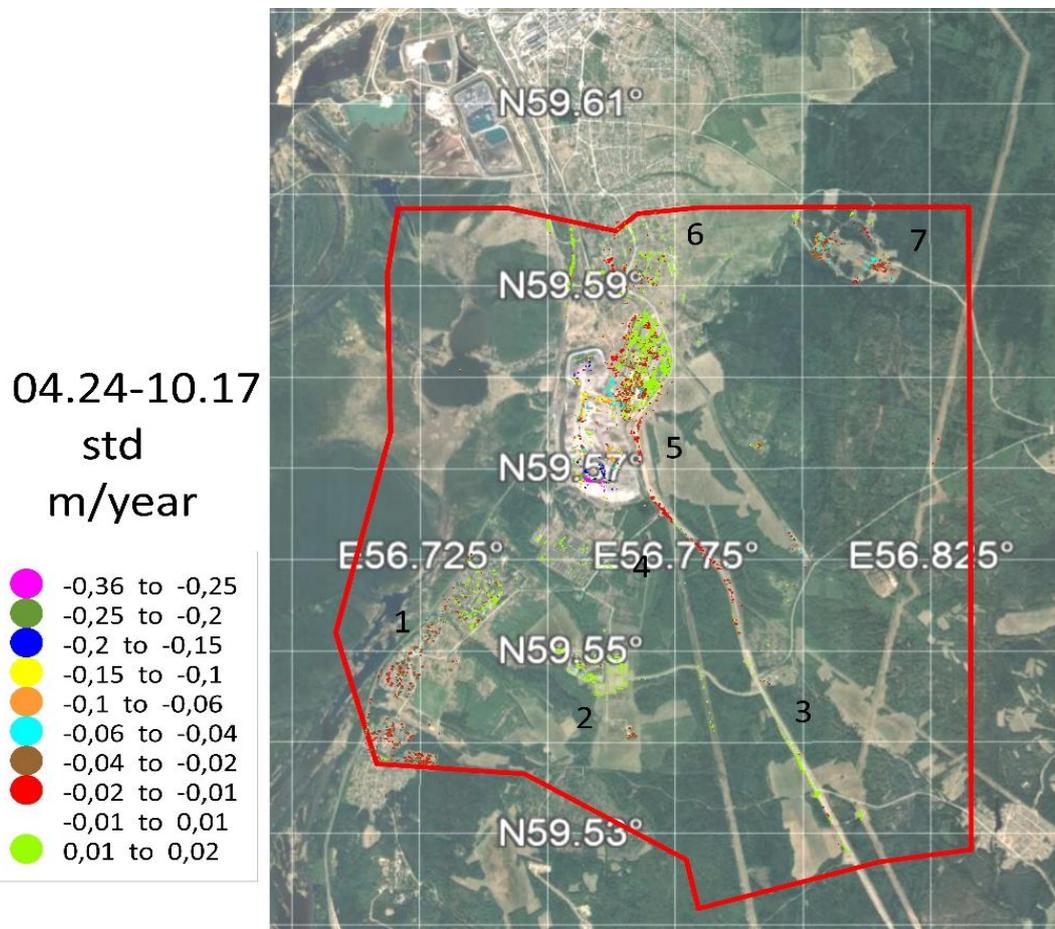


Рисунок 3.18 – Смещения, зарегистрированные в пределах горного отвода СКРУ-2 по снимкам спутника TerraSAR-X с 24 апреля по 28 октября 2022 г. Смещения показаны начиная с 0.01 м/год. Цифрами обозначены следующие области: 1 – поселок Родники, южнее его – поселок Геологоразведка, на краю горного отвода – поселок Чашкина; 2 – южный рудник, восточнее цифры 2 расположена техногенная область (возможно, карьер); 3 – сад Магний (севернее цифры) и область шоссейной дороги со смещениями в интервале ± 0.01 м/год; 4 – птицефабрика (на

западе) и область опусканий южнее солеотвала; 5 – солеотвал; 6 – поселок Рубцово; 7 – область провала. Все названия взяты с карты на сайте <https://OpenStreetMap.org>

В северной части поселка Родники смещения небольшие и их знак колеблется в пределах ± 0.02 м/год. В южной части этого поселка и далее на юг на территории поселков Геологоразведка и Чашкина располагается область исключительно отрицательных смещений (оседаний) со средней скоростью до -0.04 м/год. В 2021 г. смещения здесь были близки к нулю. Этот результат требует пристального изучения по снимкам последующих лет. В районе южного борта солеотвала, на шоссейной дороге, в области, обозначенной цифрой 1, зафиксированы только оседания со средней скоростью до -0.04 м/год. В центральной части провала, где, судя по космическим снимкам, идет активная работа по предотвращению дальнейших оседаний, смещения получить не удалось. Это связано с временной декорреляцией – существенными быстрыми изменениями на земной поверхности между повторными снимками. В восточной и западной части области провала (рисунок 3.19), где работы ведутся, по всей вероятности, менее интенсивно, получены оседания со средней скоростью до -0.1 м/год (в небольшой области – до -0.15 м/год). Пиксели, в которых получены такие оседания, образуют плотные кластеры, оседания в которых вероятнее всего связаны с процессами в горной выработке.

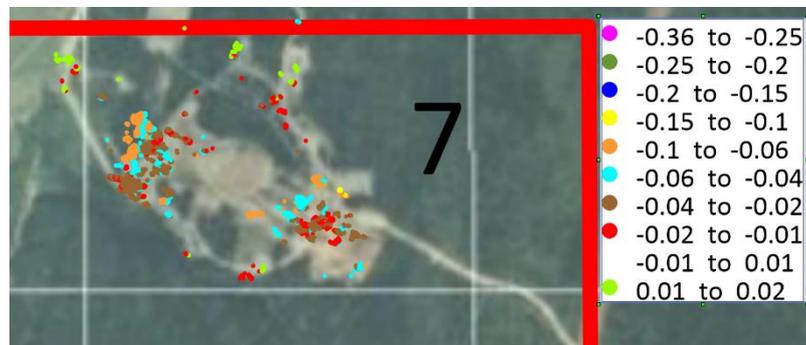


Рисунок 3.19 – Увеличенный фрагмент карты оседаний по данным за 2022 г. на область провала на северо-востоке горного отвода

3.5 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. Примером такого участка является

область в начале проспекта Ленина. Оседания здесь немного ускорились во второй половине 2020 г. и заметно ускорились в 2021 году по сравнению с 2020 годом.

Временные ряды оседаний для областей, обозначенных цифрами 1–7 на рисунке 3.15 А, представлены на рисунке 3.20.

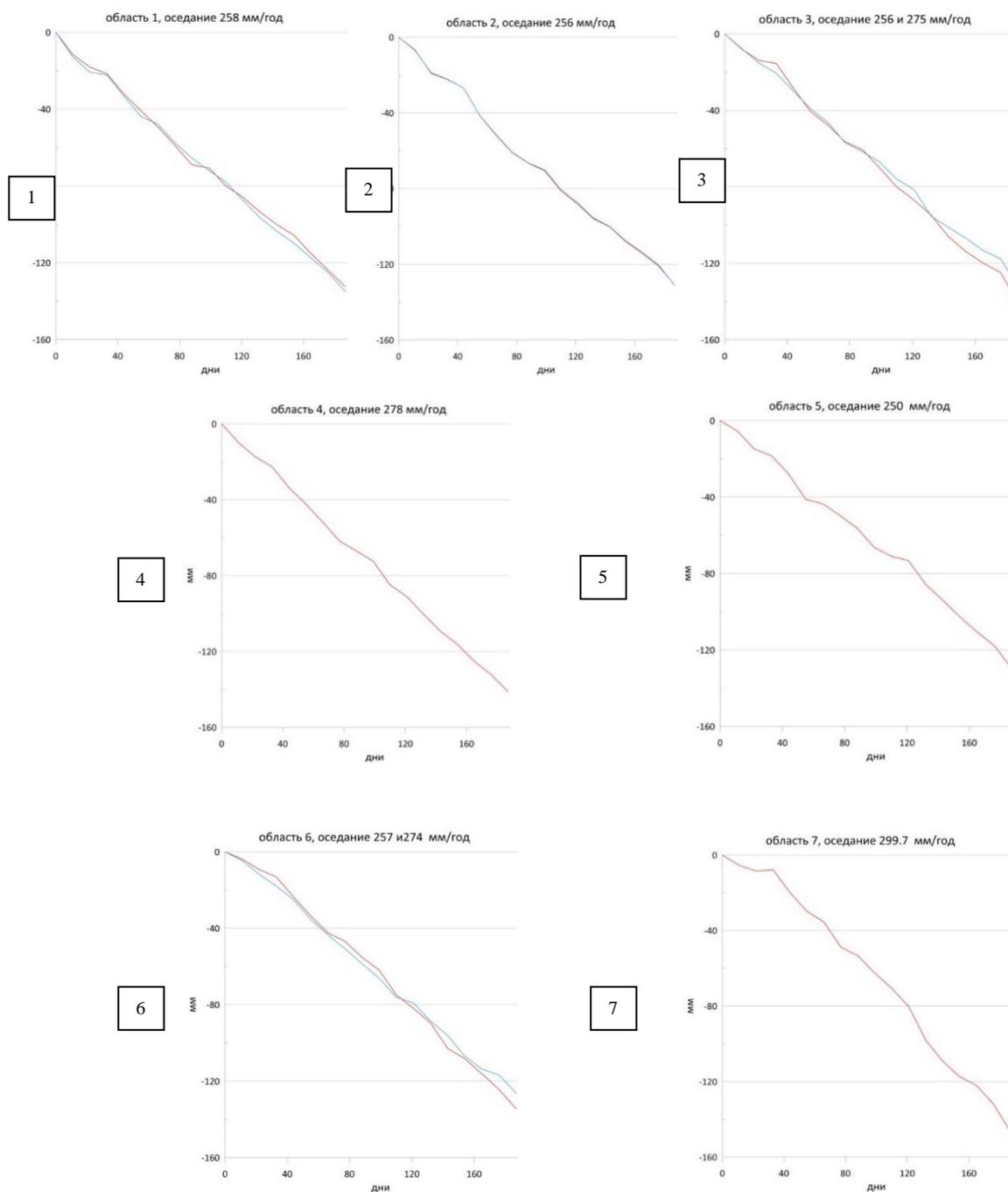


Рисунок 3.20 – Временные ряды субвертикальных оседаний (в мм) устойчиво отражающих объектов в г. Березники, расположенных в областях, помеченных цифрами 1–7 на рисунке 3.15 А, полученные по снимкам за 2020 г. В некоторых случаях в выбранную окрестность попадает по несколько отражателей. Они показаны графиками разного цвета. Над графиками указаны

скорости оседаний в мм/год; по горизонтальной оси отложены дни, начиная с 29.04.2020 г. Здесь и на рис. 3.22 слева указаны номера областей

В областях 1–4 оседания происходили во времени равномерно, без существенных изменений скорости. На некоторых временных рядах (например, области 6 и 7) заметно замедление оседаний в весенний период. Этот эффект потребовал более детального исследования, результаты которого приведены ниже. Небольшие флуктуации в течение летнего периода, скорее всего, связаны с изменением условий радарной съёмки (атмосфера, растительность).

Обратимся теперь к анализу временных рядов оседаний на территории посёлков, расположенных южнее г. Березники. Средние скорости смещений, оценённые методом устойчивых отражателей, показаны на рисунке 3.21. В целом результаты согласуются со смещениями, полученными методом суммирования интерферограмм.

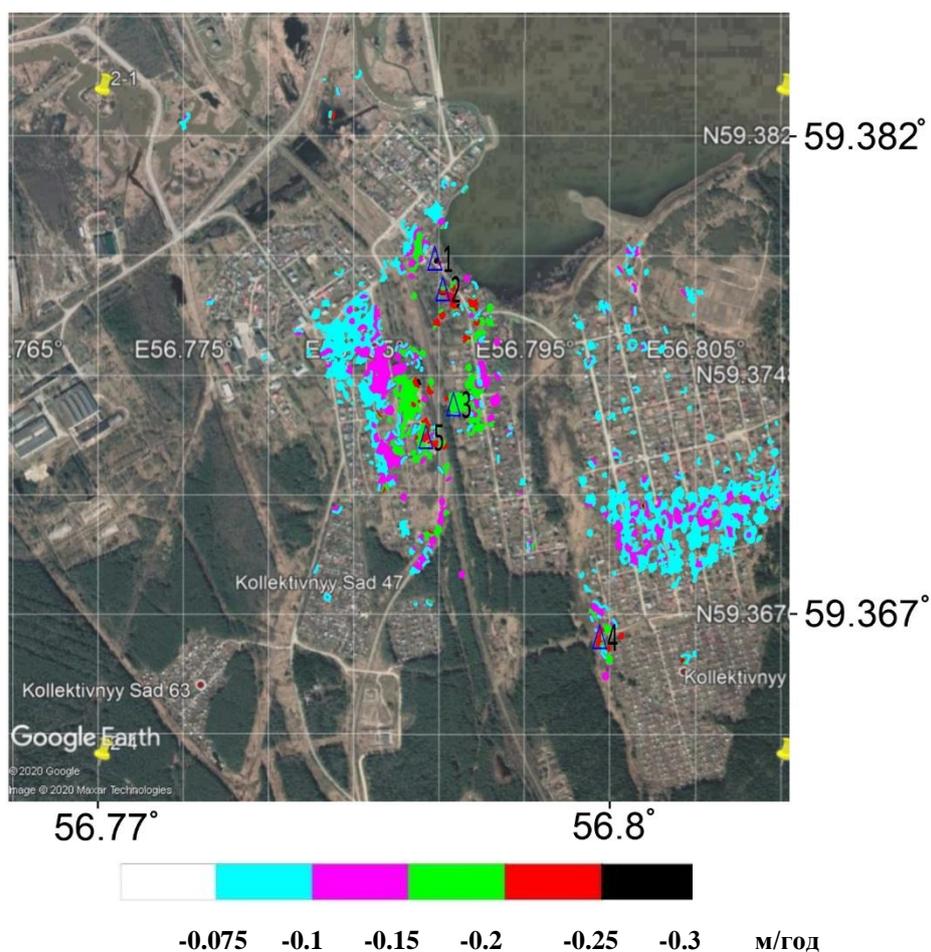


Рисунок 3.21 – Средние скорости субвертикальных оседаний (м/год) в 2021 г. для посёлков, расположенных южнее г. Березники. Треугольники с цифрами показывают области, для которых построены временные ряды оседаний на рисунке 3.22

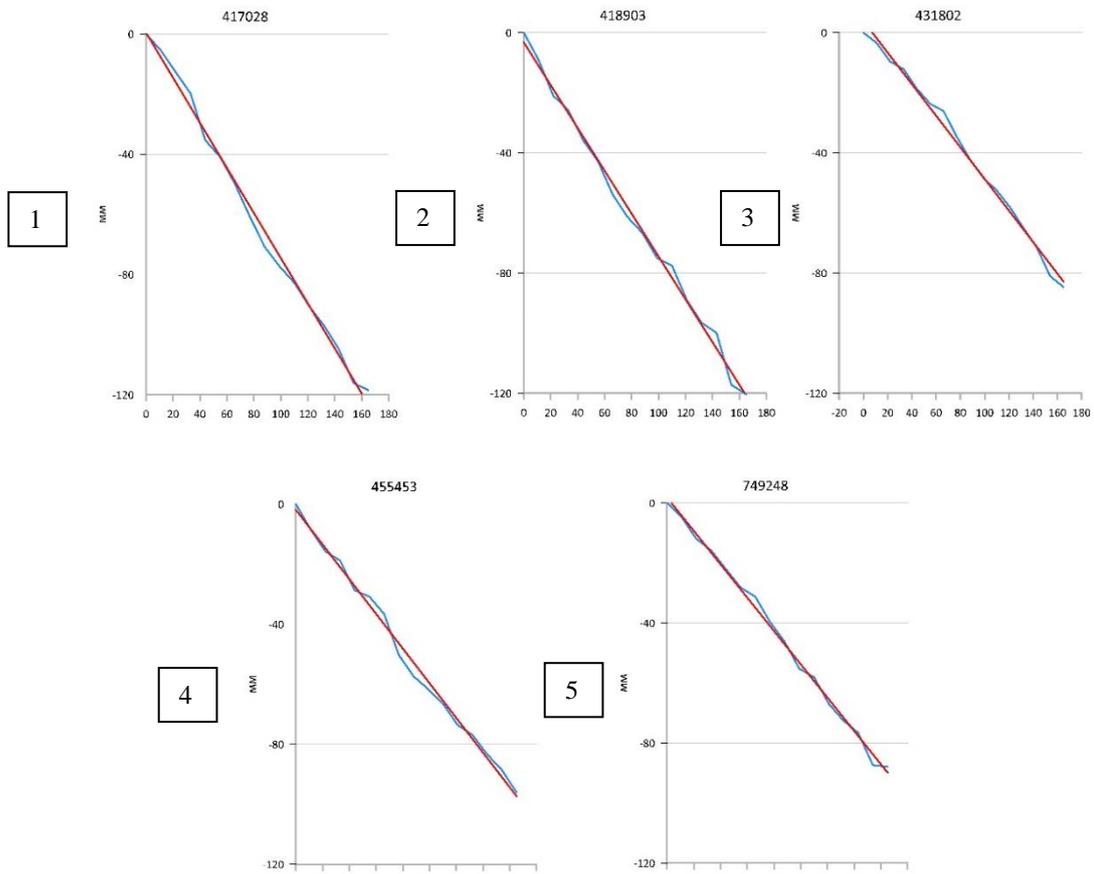


Рисунок 3.22 Временные ряды субвертикальных оседаний (в мм) для областей, отмеченных на рис. 3.20 треугольниками. Красная прямая – линейный тренд. По горизонтальной оси отложены дни, начиная с 27.04.2021 г. Слева указаны номера областей (см. рисунок 3.21); над графиками – номер устойчивого отражателя

Временные ряды в областях интенсивных оседаний демонстрируют устойчивые смещения в течение года. Мы также исследовали поведение временных рядов в течение года по всей области исследований. Поскольку число устойчивых отражателей очень велико, был применён следующий метод.

1. Были выбраны устойчиво отражающие объекты со средней скоростью оседаний более 20 мм/год. Временные ряды смещений этих объектов аппроксимировались линейными и квадратичными функциями. Если у линейной функции среднеквадратическое отклонение временного ряда от линейного тренда оказывалась в 1.5 раза больше отклонения от квадратичной зависимости, т.е. парабола существенно лучше аппроксимировала временной ряд, то данный отражатель выбирался для дальнейшего анализа.

2. Далее, для анализа выбирались только те отражатели, у которых в квадратичной зависимости величины оседаний от времени $t: f(t) = c \cdot t^2 + a \cdot t + b$ коэффициенты $c < 0$ и $a < 0$. В этом случае парабола выпукла вверх и ряд аппроксимирован её правой нисходящей, т.е. ускоряющейся ветвью.

3. Далее считаем отношение оседания за вторую половину периода съёмки к оседанию за его первую половину и, если это отношение оказывалось больше 1,5, т.е. если имелось заметное ускорение, то этот отражатель оставляем для последующего анализа.

Графики оседаний для отражателей, временные ряды смещений для которых демонстрируют ускорение в бесснежный период каждого года, показаны на рисунках 3.23–3.24. Видно, что в начале периода, весной, погружение происходит медленнее, затем выходит на почти постоянную скорость погружения.

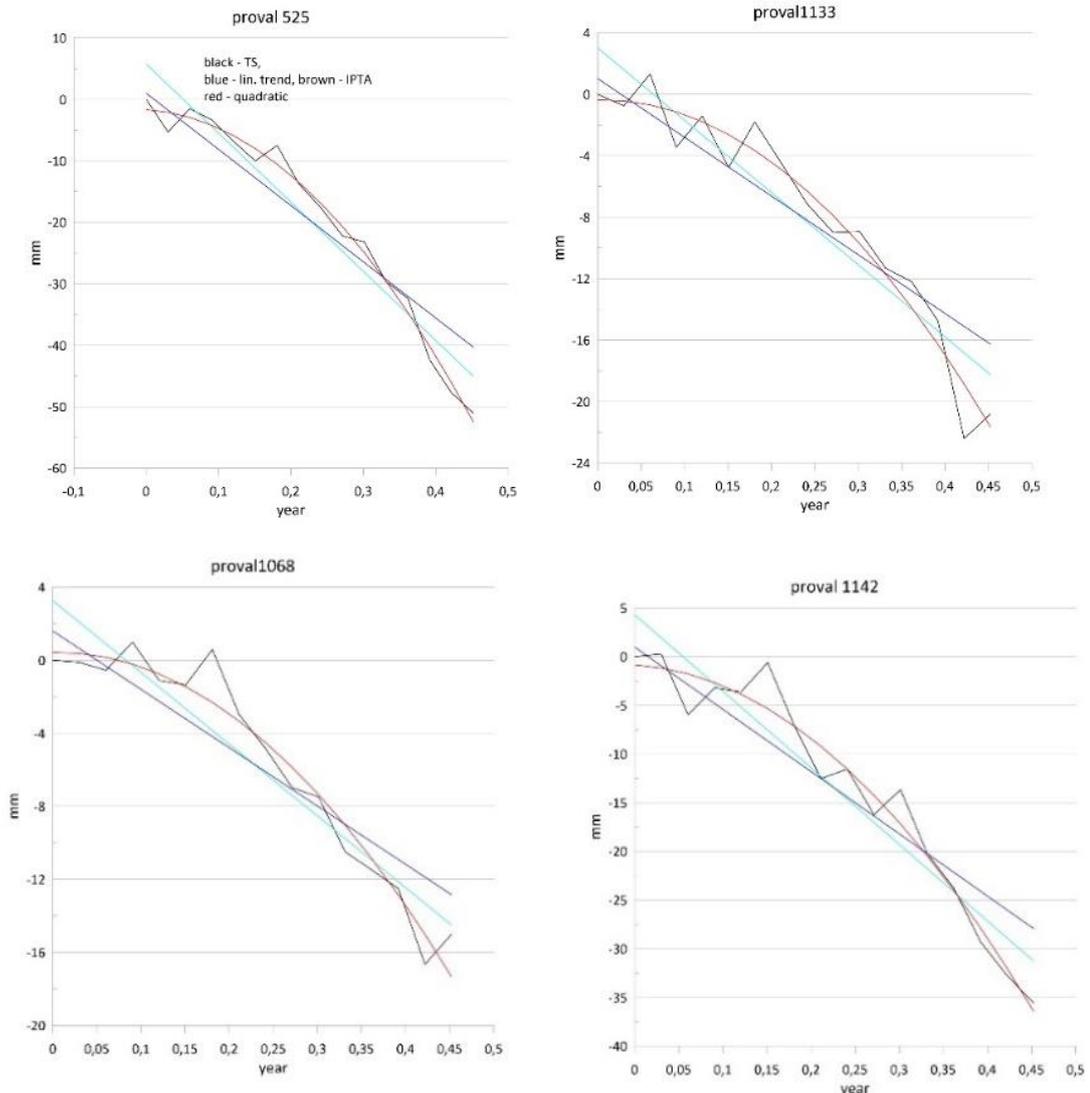


Рисунок 3.23 – Временные ряды смещений для устойчивых отражателей вокруг провала (обозначен цифрой 1 на рисунке 3.15 А) по снимкам 2021 г. Чёрная линия – временной ряд; голубая прямая – линейный тренд, построенный по временному ряду методом наименьших квадратов; синяя прямая – линейный тренд, вычисленный 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 соответствует дате 26.04.2021 г.

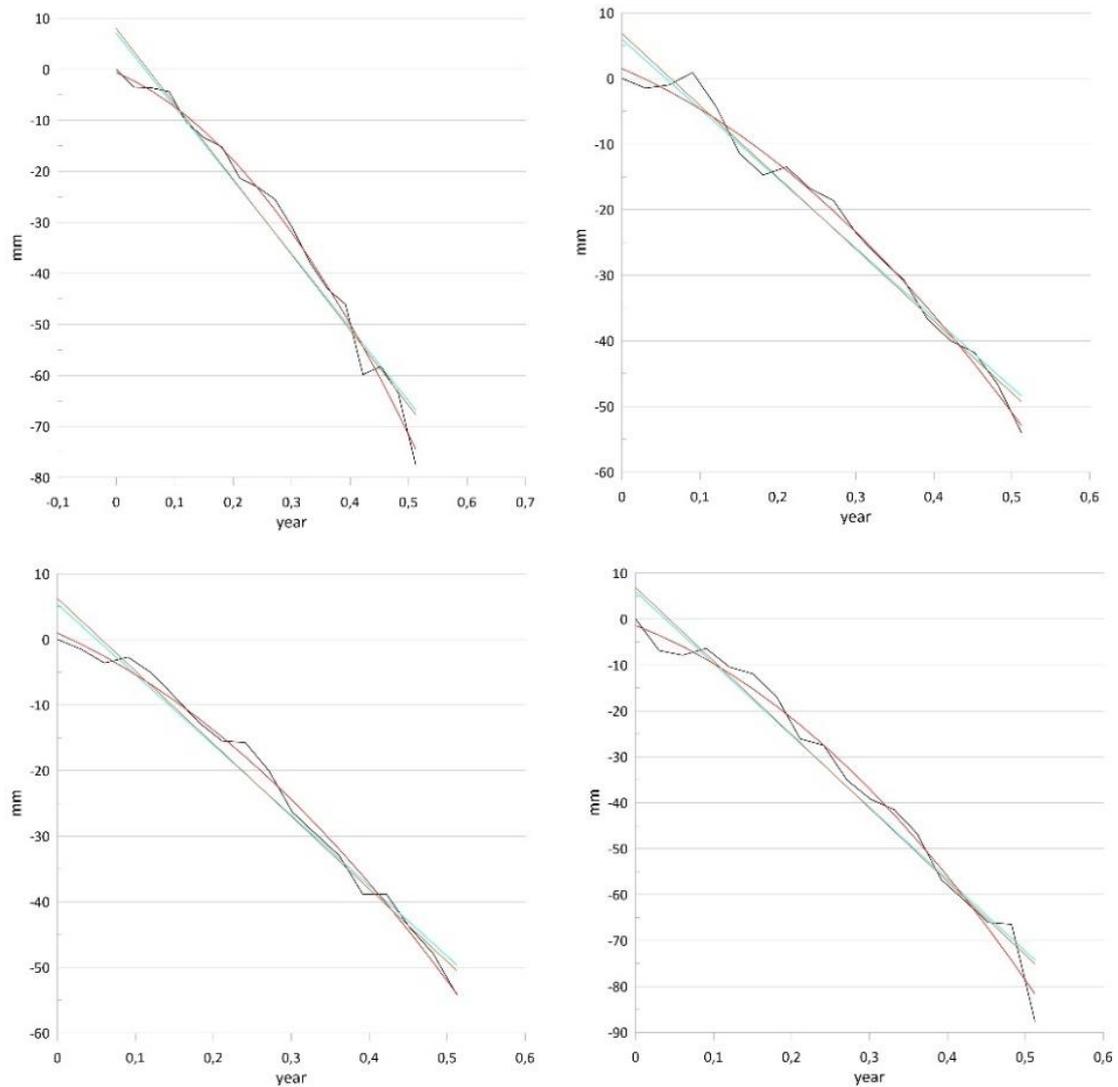


Рисунок 3.24 – Временные ряды смещений для устойчивых отражателей, расположенных на строениях восточнее области 6 (см. рисунок 3.15 А). Условные обозначения см. на рисунке 3.23

Важно, что, 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 земной поверхности 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 2021 г. и 2022 г., которые могли бы показать обратное движение при понижении температуры. Обнаруженный эффект может приводить к некоторому снижению оценок средней скорости оседания.

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.

Метод устойчивых отражателей позволил оценить смещения в отдельных областях, разделённых обширными некогерентными лесными массивами. Временные ряды также показывают замедление оседаний весной на отражателях, идентифицированных на строениях и объектах инфраструктуры. Мы связываем суммарное весеннее замедление оседаний на 3–5 см не с подземными, а с сезонными факторами, конкретно – с нагреванием строений в весенний период. В областях с умеренной скоростью оседаний этот эффект может приводить к некоторому снижению оценки средней скорости оседаний.

Разработана методика анализа временных рядов смещений, направленная на выявление областей ускоряющихся и замедляющихся оседаний. Детальное исследование временных рядов оседаний позволяет выявлять области, требующие особого внимания. Большая часть оседаний происходит более-менее равномерно; на значительной части территории скорость оседания уменьшилась. Это свидетельствует о действенности принимаемых мер по защите наземной инфраструктуры.

С применением метода суммирования парных интерферограмм и анализа временных рядов получены оценки средних скоростей смещений за период 2020-2022 годов. Полученные результаты позволили выявить основные активные области и исследовать динамику их оседаний по годам. Показано, что скорости оседаний повсеместно сохраняется или даже, уменьшаются, кроме двух областей – в районе проспекта Ленина и на юго-западном борту Нижнезырянского водохранилища (г. Березники), где скорости оседаний увеличились в 2022 г примерно на 25%. Дальнейший мониторинг оседаний в г. Березники рекомендуется проводить с использованием методов *Std* и *Step*, с последующим контролем результатов методом устойчивых отражателей IPTA или SBaS.

Спутниковая радарная интерферометрия является эффективным инструментом для исследования процессов оседания в г. Березники. Этот метод существенно дополняет наземные геодезические работы, поскольку доставляет данные об обширных территориях, которые

невозможно покрыть детальными наземными измерениями. Кроме того, поскольку часть закрытых территорий становится опасной для проведения наземных работ, здесь спутниковые технологии особенно востребованы.

Приведенные в главе 3 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 выявить области стабилизации и ускорения оседаний и оценить эффективность мер по защите горных выработок».

4. Оценки точности определения смещений земной поверхности над подземными хранилищами газа и калийными рудниками по спутниковым снимкам с одной и двух орбит с применением геомеханических моделей

4.1 Оценка точности расчёта смещений земной поверхности по спутниковым снимкам с одной и двух орбит с использованием модели подземного хранилища газа

4.1.1 Постановка задачи

Как было показано в главе 1, в результате обработки двух спутниковых изображений можно рассчитать величину смещений земной поверхности, произошедшую за период между съемками первого и второго снимков. Выпишем еще раз формулу (1.4), которая связывает смещения, определенные в направлении на спутник (LOS) с тремя компонентами вектора смещений – вертикальной (U_Z), северной (U_N) и восточной (U_E):

$$U_{LOS} = U_Z \cos \theta + \sin \theta \cdot (U_N \sin \beta - U_E \cos \beta), \quad (4.1)$$

где U_{LOS} – смещения в направлении на спутник (положительные – к спутнику); θ – угол видения спутника; β – азимут орбиты, U_Z считается положительным при смещениях вверх. Формула (4.1) справедлива при правостороннем обзоре радиолокатора относительно движения спутника. Из уравнения (4.1) следует, что 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. Одну и ту же территорию спутник может снимать с двух ракурсов – с восходящей орбиты (спутник движется с юга на север и посылает радиолокационный сигнал в восточном направлении) и с нисходящей орбиты (спутник движется с севера на юг, соответственно, сигнал от спутника распространяется в западном направлении). В этом случае возникает два уравнения (4.1) с различными коэффициентами. В данной Главе расчеты выполнялись по снимкам спутника Сентинель-1 (Sentinel-1). Параметры его съемки следующие: для нисходящей орбиты азимут орбиты спутника (β) равен 189° , угол видения спутника (θ) составляет в среднем 40° ; для восходящей орбиты, соответственно, $\beta = 349^\circ$, $\theta = 40^\circ$. Тогда для нисходящей (*desc*) орбиты можно записать следующее выражение (4.2):

$$U_{LOS}^{desc} = 0.766U_Z - 0.101U_N + 0.635U_E. \quad (4.2)$$

Для восходящей (*asc*) орбиты, соответственно (4.3):

$$U_{LOS}^{asc} = 0.766U_Z - 0.123U_N - 0.631U_E. \quad (4.3)$$

Исходя из уравнений (4.2) и (4.3) можно сделать вывод, что вклад в U_{LOS} северной компоненты смещений (U_N) заметно меньше, чем вклад вертикальной U_Z и восточной U_E компонент. Если имеются данные только с одной орбиты (с восходящей или нисходящей) и есть основания полагать, что горизонтальные компоненты смещений не превосходят вертикальную компоненту, можно оценить вертикальные смещения, разделив полученные смещения в направлении на спутник на косинус угла наклона зондирующего луча. Эти смещения в дальнейшем будут называться субвертикальные. Если имеются снимки с нисходящей и восходящей орбит, и данные об изучаемом процессе позволяют полагать, что смещения на север (U_N) не превосходят смещения в других направлениях, то в формулах (4.2), (4.3) северной компонентой можно пренебречь, и из двух уравнений рассчитать вертикальную U_Z и восточную U_E компоненты смещения. Так, вертикальные смещения будут равны (4.4):

$$\hat{U}_Z = \frac{d_2 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \cos(\beta_1) - d_1 \cdot \sin(\theta_2) \cdot \cos(\beta_2)}{\sin(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2) \cdot \cos(\beta_1) - \sin(\theta_2) \cdot \cos(\theta_1) \cdot \cos(\beta_2)}, \quad (4.4)$$

где d_1, d_2 – смещения в направлении на спутник (LOS); θ_1, θ_2 – углы видения; β_1, β_2 – азимуты восходящей (индекс 1) и нисходящей (индекс 2) орбиты.

Такие оценки часто выполняются при мониторинге различных природных и техногенных объектов. Исключив из уравнений (4.2)–(4.3) восточную компоненту, получим:

$$d_2 \cdot 0.631 + d_1 \cdot 0.635 = 0.969 \cdot U_Z - 0.142 \cdot U_N, \quad (4.5)$$

где коэффициент при северной компоненте U_N равен коэффициенту при вертикальной компоненте U_Z , умноженному на 0.147. Итак, даже если северная компонента окажется равной вертикальной, ошибка оценки U_Z будет менее 15 %. Исключим теперь из уравнений (4.2) – (4.3) вертикальную компоненту. Тогда коэффициент при U_N будет равен коэффициенту при восточной компоненте U_E , умноженному на 0.017, т. е. ошибка в расчёте U_E с двух орбит при равенстве смещений на север и на восток будет менее 2 %. Для более точной оценки используем теоретическую модель подземного хранилища газа [3].

4.1.2 Модель смещений земной поверхности для подземного хранилища газа (ПХГ)

Для исследования точности оценки вертикальных и восточных компонент смещений по данным с одной или с двух орбит была использована модель, близкая к ПХГ, для которой были проведены расчеты по реальным данным спутника Sentinel-1. Предположим, что за некоторый период времени на ПХГ произведен отбор газа, из слоя постоянной мощности $H = 100$ м, с

глубиной средней линии $D = 350$ м, ограниченного некоторым замкнутым контуром. Также будем считать, что связанные с отбором газа смещения земной поверхности зарегистрированы с восходящей и нисходящей орбит спутника. Зададим суммарное изменение давления P в период отбора газа в виде:

$$\Delta P(x, y) = P_0 \exp\left(\frac{x^2 + y^2}{a}\right), \quad (4.6)$$

где $P_0 = -1.6$ МПа; $a = 5$ км²; начало координат расположено в точке с географическими координатами (λ_0, θ_0) на земной поверхности над центром ПХГ; (x, y) – расстояние в километрах от текущей точки счета (λ, θ) до начала координат. Ось X направлена на восток, ось Y – на север, ось Z – вверх. Сферичностью Земли в пределах ПХГ пренебрегаем.

Для расчета компонент смещений используется известное решение задачи теории упругости о смещениях поверхности упругого полупространства в результате изменения давления в расположенном под поверхностью на глубине D центре дилатации (малой сферической области). Согласно работе [56], смещения свободной поверхности на восток, север и по вертикали (U_x, U_y и U_z соответственно) в результате изменения давления ΔP в малом объеме V задаются следующими выражениями (для удобства переведем их из цилиндрической в прямоугольную систему координат):

$$\begin{cases} U_x(x, y, 0) = AV \frac{x}{R^3} \\ U_y(x, y, 0) = AV \frac{y}{R^3}, \\ U_z(x, y, 0) = AV \frac{D}{R^3} \end{cases} \quad (4.7)$$

где $A = (\Delta P \cdot C_m(1 - \nu))/\pi$ – безразмерный коэффициент; ν – коэффициент Пуассона; V – объем сферической области, в котором изменяется давление; D – глубина центра этой области; C_m – коэффициент одноосного уплотнения пород резервуара; R – расстояние от центра сферической области с координатами $(0, 0, D)$ до точки расчета смещений на дневной поверхности $(x, y, 0)$.

Поскольку мощность резервуара существенно меньше его горизонтальных размеров, при выводе соотношений (4.7) принято, что деформации пласта происходят в основном в вертикальном направлении. В этом случае коэффициент одноосной сжимаемости C_m можно получить из общих уравнений теории пороупругости [39], задав равными нулю горизонтальные деформации. Тогда коэффициент одноосной сжимаемости C_m связан с коэффициентом объемной сжимаемости C_b и коэффициентом объемной сжимаемости скелета C_r следующим соотношением:

$$C_m = \frac{1 + \nu}{3 \cdot (1 - \nu)} \cdot (C_b - C_r). \quad (4.8)$$

При этом, в формуле (4.8) часто допускают, что коэффициент сжимаемости скелета C_r существенно меньше коэффициента объемной сжимаемости C_b . Также, для изотропной среды справедливо соотношение (например, [36]):

$$C_m = \frac{(1-2\nu) \cdot (1+\nu)}{E \cdot (1-\nu)}, \quad (4.9)$$

где E – модуль Юнга.

Уравнения (4.7) с точностью до коэффициентов совпадают с уравнениями для производных гравитационного потенциала от точечного источника. Если изменение давления происходит в некоторой области, то для получения суммарного эффекта необходимо проинтегрировать уравнения (4.7) по объему этой области. На это обстоятельство, по-видимому, впервые обратил внимание МакМиллан в 1930 г. [67]. В его книге получено решение для параллелепипеда. Позднее Вальдфогель [87] получил решение для многогранников. Эти формулы были использованы для решения задачи о включении в виде многогранника в упругой среде [72, 81]. Позже, по аналогии, были выписаны решения и для других областей простой формы – цилиндр, прямоугольный параллелепипед, полубесконечный пласт и т.д. [19, 20, 44]. Эти аналогии были использованы для анализа и решения задачи с помощью хорошо разработанного аппарата теории потенциала.

Для моделирования смещений дневной поверхности над ПХГ разобьем эксплуатируемый горизонт на небольшие прямоугольные элементы – пластины со сторонами, параллельными осям координат O_x и O_y , и примем, что изменение давления в каждой пластине постоянно, а ее толщина мала по сравнению с ее глубиной. Тогда, проинтегрировав выражения (4.7) в пределах каждой прямоугольной площадки, получим:

$$\begin{cases} U_x(x, y, z) = AH \frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{R-(\eta-y)}{R+(\eta-y)} \right) \right]_{\xi_1, \eta_1}^{\xi_2, \eta_2} \\ U_y(x, y, z) = AH \frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{R-(\xi-x)}{R+(\xi-x)} \right) \right]_{\xi_1, \eta_1}^{\xi_2, \eta_2} \\ U_z(x, y, z) = AH \frac{1}{2} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{(\xi-x) \cdot (\eta-y)}{R(D-z)} \right) \right]_{\xi_1, \eta_1}^{\xi_2, \eta_2} \end{cases}, \quad (4.10)$$

где H – толщина пластины; (x, y) – координаты точки на земной поверхности ($z = 0$), в которой рассчитываются смещения; D – глубина пластины; квадратные скобки с индексами – обозначают последовательную подстановку пределов интегрирования (четырех углов пластины), которая располагается вдоль оси O_x от ξ_1 до ξ_2 , а вдоль оси O_y – от η_1 до η_2 ; R – декартово расстояние от точки (x, y) до соответствующего угла пластины.

Далее набором прямоугольных пластин был аппроксимирован пласт, в котором происходит закачка и отбор газа, в каждой пластине было задано изменение давления согласно формуле (4.6).

Остальные параметры: безразмерный коэффициент A в формуле (4.10) были приняты для всех пластин одинаковым; $\nu = 0.25$; $C_m = 6 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$ – величины, характерные для высокопористых песчаных слоев [56]; $H = 100$ м; $D = 350$ м; горизонтальные размеры пластин по широте и долготе составляли 0.005° .

Теперь на основе соотношений (4.10) можно рассчитать теоретические компоненты смещения по трём направлениям, а также смещения на спутник для съёмки с восходящей и нисходящей орбит, используя реальные углы наклона зондирующего луча и азимуты полёта (рисунок 4.1).

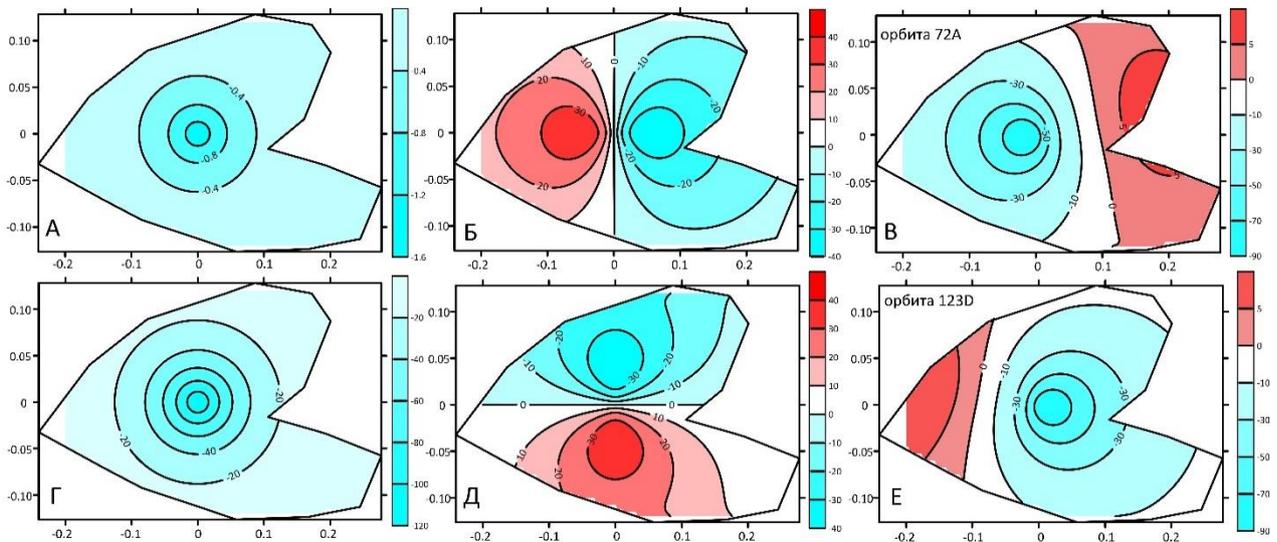


Рисунок 4.1 – Карта падения давления (в МПа) в результате отбора газа (А); карты компонент смещений (в мм): вертикальной (Г), восточной (Б), северной (Д) и в направлении LOS для восходящей (В) и нисходящей (Е) орбиты. Восходящая орбита проходит западнее ПХГ, нисходящая — восточнее. Оси — расстояние от области максимального падения давления (в градусах): 0.1° по широте соответствует примерно 11.1 км, по долготе — 7.9 км. Чёрный контур — границы модельного ПХГ

4.1.3 Оценка точности расчёта смещений земной поверхности по спутниковым снимкам с одной и двух орбит

Спутниковая съёмка реального ПХГ, к которому близка наша теоретическая модель, осуществлялась с орбит с азимутом 190.5° и 349.5° . Углы наклона зондирующего луча были взяты с соответствующих снимков области ПХГ. Заметим, что на картах отрицательных LOS -смещений (т.е. «оседаний») имеются и области небольших положительных смещений (в сторону спутника). Они возникают там, где вклад горизонтальной компоненты смещений в формуле (4.1) превосходит вклад вертикальной компоненты смещений. Максимум в поле смещений на спутник

всегда сдвигается относительно точки максимального значения вертикальной компоненты (см. рисунок 4.1 Г) в сторону спутника, т. е. для восходящей орбиты — на запад (см. рисунок 4.1 В), для нисходящей орбиты — на восток (см. рисунок 4.1 Е). В дальней от спутника области возникает смещение противоположного знака. Максимальное вертикальное оседание в теоретической модели: -115.3 мм (см. рисунок 4.1 Г), максимальное смещение в направлении LOS : -88.4 мм (рисунок 4.1 В и Е), поднятия на краях ПХГ достигают 10.0 мм.

Далее, полагая, что горизонтальные смещения не превосходят вертикальные, оценим субвертикальные смещения с каждой орбиты, получаемые делением смещений LOS на косинус угла зондирующего луча (рисунок 4.2). Из рисунка следует, что максимумы субвертикальных оседаний для восходящей и нисходящей орбит смещены так же, как и на картах U_{LOS} (см. рисунок 4.1 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. Области поднятий на периферии ПХГ также сохранились. Максимальные погрешности фиксируются примерно в той же области, в которой достигают максимума смещения на восток (см. рисунок 4.1 Б), т. е. на западном и восточном бортах мульды оседаний.

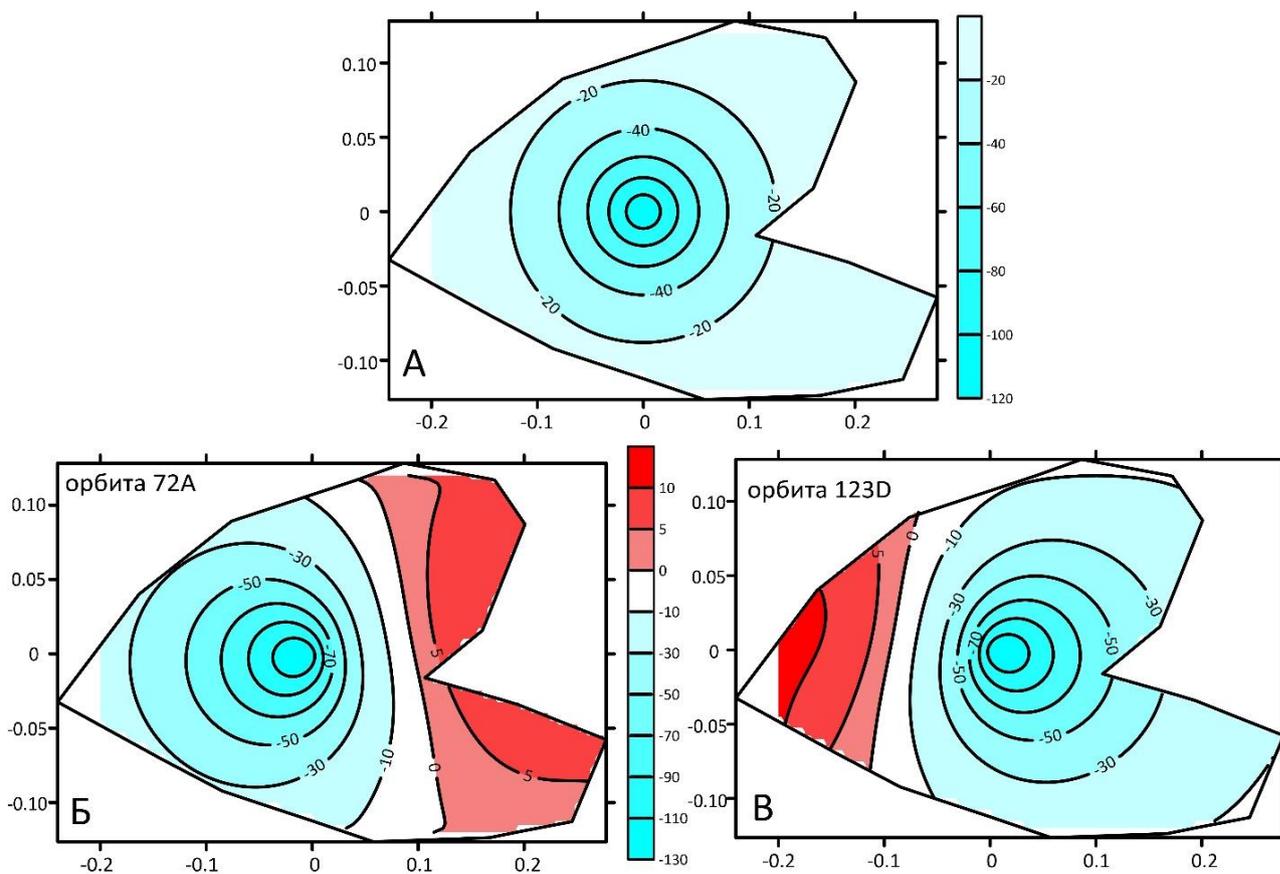


Рисунок 4.2 – Сравнение теоретической вертикальной компоненты смещений (А) и субвертикальных смещений, полученных с восходящей (Б) и нисходящей (В) орбиты. Цветовая шкала в миллиметрах; по осям — расстояние от области максимального падения давления (в

град): 0.1° по широте соответствует примерно 11.1 км, по долготе — 7.9 км. Чёрный контур — границы модельного ПХГ

На рисунке 4.3 приведён профиль, пересекающий ПХГ по центру области оседаний с запада на восток. Максимум субвертикальных смещений сдвинут в направлении к спутнику, обращённое к спутнику крыло мульды сдвижения — более пологое. Величины оседаний определяются с точностью 8 % (125 мм с одной орбиты при истинном значении 115.34 мм).

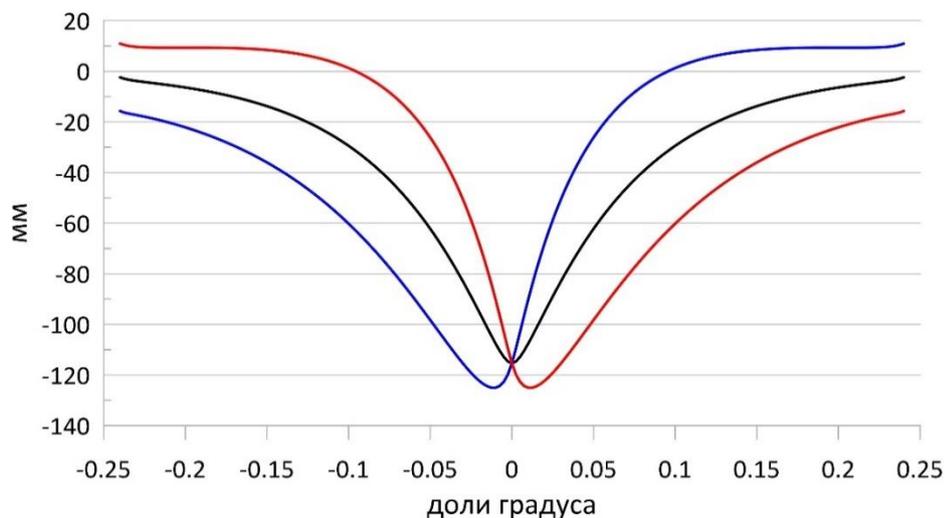


Рисунок 4.3 – Вертикальные смещения вдоль профиля, пересекающего ПХГ с запада на восток (чёрная кривая). Синий график — субвертикальные смещения, рассчитанные с восходящей орбиты; красный — то же с нисходящей орбиты; 0.1° соответствует примерно 7.9 км

Далее, с использованием рассчитанных смещений в направлении на спутник с одной восходящей и одной нисходящей орбит по формулам, аналогичным (4.2) – (4.3), были рассчитаны вертикальные и восточные компоненты смещений в предположении, что северной компонентой смещений можно пренебречь (рисунок 4.4 Б, Д). Полученные смещения были сопоставлены с модельными (теоретическими) смещениями по вертикали и на восток, их разность представлена на рисунке 4.4 В, Е.

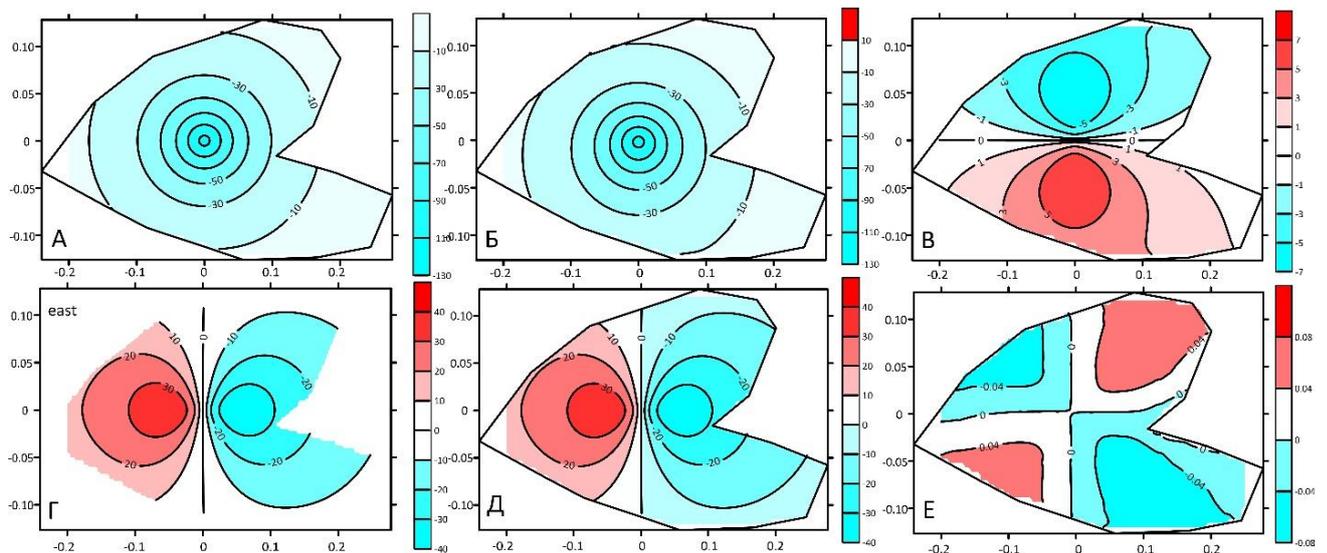


Рисунок 4.4 – Сопоставление теоретических вертикальной (А) и восточной (Г) компонент смещений со смещениями, рассчитанными с двух орбит, в предположении, что смещения на север можно пренебречь. Карты (Б) и (Д) показывают полученные компоненты смещения по вертикали и на восток; на картах (В) и (Е) показана разность теоретических и расчётных величин. Смещения в миллиметрах; масштаб по осям такой же, как на рисунках 4.1 и 4.2

Сопоставление показало, что ошибки расчёта вертикальной и восточной компонент смещений не превосходят 10 мм, т. е. находятся на уровне точности метода РСА-интерферометрии. Действительно, максимальное значение вертикальной компоненты смещений определено абсолютно точно (–115.3 мм) и не смещено. Максимальные расхождения между теоретическими и расчётными значениями располагаются на северном и южном бортах мульды оседаний, в области максимальной северной компоненты смещений (см. рисунок 4.1 Д). Здесь они достигают 5.8 мм при максимальном значении оседаний, равном 115.3 мм, т. е. 5 % (см. рисунок 4.4 В). Максимальная ошибка определения восточной компоненты смещений составила всего 0.08 мм при максимальном смещении восточной компоненты 37.0 мм (см. рисунок 4.4 Г, Д, Е).

4.1.4 Выводы по разделу 4.1

Поскольку орбита РСА-спутников близка к полярной, смещения на север входят в уравнение для расчета смещений в направлении на спутник с коэффициентом, существенно меньшим, чем смещения по вертикали и на восток. Если есть основания полагать, что северная компонента смещений не превосходит смещения в других направлениях, то вкладом северной компоненты можно пренебречь и рассчитать смещения по вертикали и на восток по смещениям в направлении на спутник, определенным с восходящей и нисходящей орбиты. Если имеются

снимки только с одной орбиты и можно предположить, что горизонтальные смещения не превосходят вертикальные, то, пренебрегая горизонтальными компонентами, можно оценить вертикальную компоненту смещений, поделив смещения, рассчитанные в направлении на спутник, на косинус угла наклона зондирующего луча. Такие оценки часто делаются при мониторинге различных природных и техногенных объектов. Используя геомеханическую модель подземного хранилища газа, близкую к одному из ПХГ, для которого ранее нами были проведены расчёты по реальным данным, в работе выполнена оценка точности такого подхода.

Показано, что при использовании снимков с нисходящей и восходящей орбиты, ошибка определения вертикальных смещений составляет около 5%, а восточной компоненты смещений – 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 ошибкой менее 10%, но области поднятий и оседаний оказываются сдвинутыми в сторону спутника относительно их истинного положения.

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 ПХГ и месторождений нефти и газа.

4.2 Оценки точности определения смещений земной поверхности над калийными рудниками по спутниковым снимкам с одной и двух орбит с применением геомеханической модели

4.2.1 Постановка задачи

При разработке подземных месторождений водорастворимых руд, таких как калийные соли, в основном используется камерно-столбовая система, при которой необходимым условием является поддержание водозащитной толщи на междукамерных целиках. Это обеспечивает защиту шахт и рудников от прорыва пресных вод в горные выработки [10, 79]. В благоприятных условиях, например, на Старобинском месторождении калийных солей (Республика Беларусь), применяются различные варианты столбовых систем разработки, в некоторых случаях – с обрушением выработанного пространства [18]. При этом на земной поверхности формируются мульды сдвижения², которые перемещаются вслед за движением фронта очистных работ. Для оценки негативного воздействия горных работ на здания и объекты инфраструктуры, а также

² Мульда сдвижения – часть земной поверхности, подвергающаяся оседанию и сдвигению под влиянием подземных выработок [6].

принятия конструктивных мер охраны, нормативно необходимым является ведение мониторинга оседаний земной поверхности и прогноза их ожидаемых величин. Прогнозирование сдвижений земной поверхности при отработке сильвинитовых пластов длинными очистными забоями (лавами) базируется на эмпирических соотношениях [31, 32], а также на численных конечно-элементных упругопластических моделях [11]. Параметры численных моделей определяются по данным лабораторных испытаний горных пород, натуральных измерений, включая геодезические наблюдения за оседаниями земной поверхности.

Проведение регулярного мониторинга оседаний на больших территориях над подземными горными выработками с помощью наземных методов требует больших трудозатрат, поэтому целесообразно привлекать технологии, основанные на использовании спутниковых данных. РСА-интерферометрия является эффективным методом мониторинга динамики смещений земной поверхности. Повторная съемка, например, спутником Sentinel-1A, выполняется с интервалом в 12 дней, независимо от освещенности и погодных условий.

Как было показано в разделе 4.1, при наличии спутниковых данных совместно с двух орбит (нисходящей и восходящей), и при условии незначительного вклада северной компоненты в суммарное поле смещений, возникает система из двух уравнений с двумя неизвестными, из которых можно рассчитать смещения по вертикали и на восток. При наличии данных с одной орбиты можно оценить субвертикальные смещения, при условии, что горизонтальные смещения невелики. Также было отмечено, что 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 мульд сдвижения на местности по картам смещений на спутник U_{LOS} . Таким образом, необходимо определить, как смещаются оси областей оседания над калийными рудниками относительно их истинного положения и какие возникают ошибки в оценке величин оседаний при использовании снимков с одной или совместно с двух орбит [4]. Для решения этой задачи нами использована модель оседаний над длинной горной выработкой, приведенная в работе [32].

4.2.2 Модель оседаний земной поверхности над горными выработками, разрабатываемыми столбовой системой

Для того, чтобы провести необходимые расчеты компонент вектора смещений, необходимо иметь модель сдвижений над горными выработками. Для этого нами использована инженерная (классическая) модель оседаний земной поверхности над одиночной лавой. [32]. Под лавой

понимается подземная очистная горная выработка, в которой производится добыча соленосных пород, имеющая значительную протяженность (от нескольких десятков до нескольких сотен метров), один борт которой образован соленосным массивом (забоем лавы), а другой – закладочным материалом или обрушенной породой. Выбранная модель представляет собой эмпирические соотношения между параметрами горной выработки и геометрией мульды сдвижений на земной поверхности. Эта инженерная модель не дает точного решения, но вполне подходит для анализа соотношений величины и геометрии мульды оседания, определенных с одной или совместно с двух орбит.

Расчет ожидаемых сдвижений и деформаций, обусловленных первичной подработкой земной поверхности одиночной выработкой (лавой), производится следующим образом. Введем на земной поверхности декартову систему координат xOy . Ось Ox направим по движению фронта очистных работ, ось Oy – повернем под углом 90° к оси Ox против часовой стрелки. Далее мы будем называть сечение Ox главным или продольным, а Oy – поперечным (рисунок 4.5). Начало координат располагается в точке пересечения главных сечений мульды сдвижения, проходящих при неполной подработке через точку максимального оседания, а при полной подработке – через начало плоского дна на внутренней границе краевой части мульды³.

Введем безразмерные координаты (ξ, η) :

$$\xi = x/L_x; \quad \eta = y/L_y, \quad (4.11)$$

где x, y – абсолютные координаты в главных сечениях мульды сдвижения по осям Ox и Oy , L_x, L_y – полудлина мульд в главных сечениях в направлении осей Ox, Oy соответственно.

Расчет полудлины мульды сдвижения L_x, L_y проводится по формулам:

а) при полной подработке вдоль оси Oy :

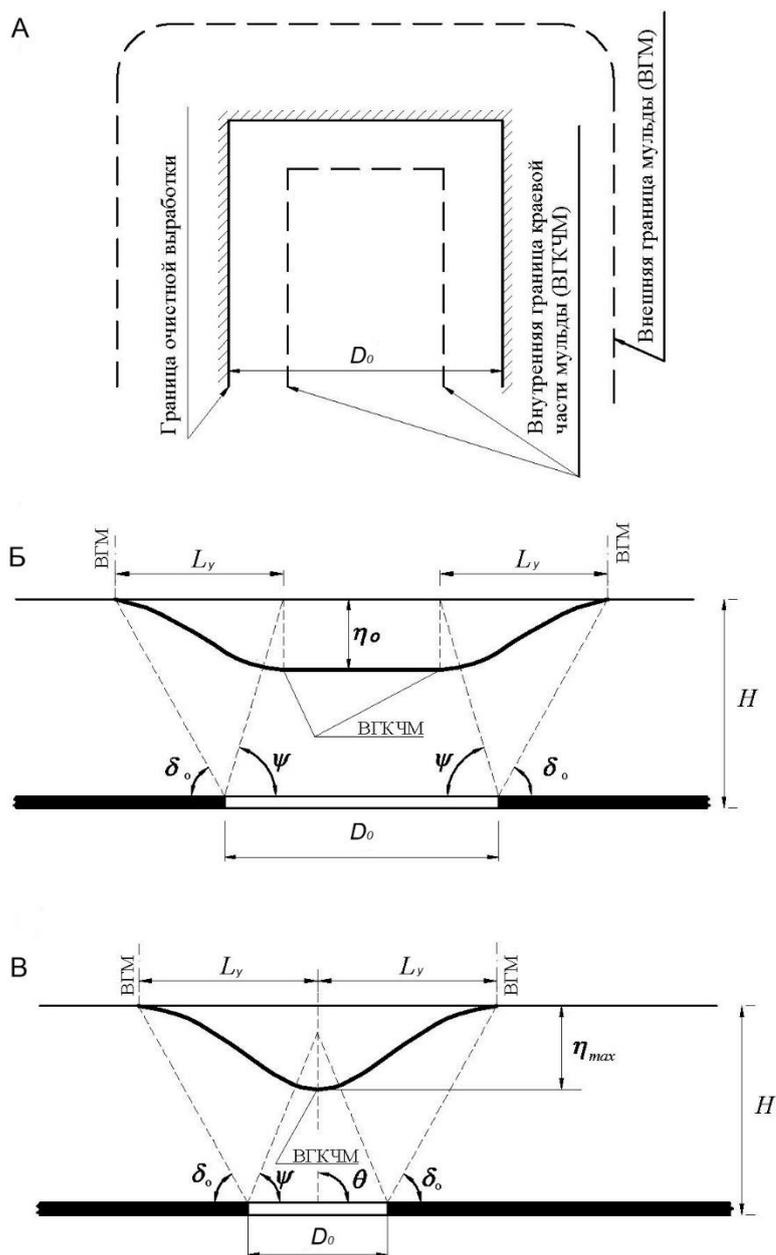
$$L_y = H \times (\text{ctg } \delta_0 + \text{ctg } \psi), \quad (4.12)$$

б) при неполной подработке вдоль оси Ox :

$$L_x = H \times \text{ctg } \delta_0 + D_0 / 2, \quad (4.13)$$

где H – глубина выработки, м; δ_0 – граничный угол, равный $\delta_0 = 60^\circ$; ψ – угол полных сдвижений, равный $\psi = 55^\circ$; D_0 – размер отработанного блока в направлении оси Oy , м.

³ Полная подработка – подработка поверхности, при которой в мульде образуется плоское дно и дальнейшее увеличение площади подработки не приводит к увеличению максимального оседания [6].



A – схема положения горных работ; Б – полная подработка; B – неполная подработка

Рисунок 4.5 – Основные параметры мульды сдвижения, обусловленной влиянием отработки отдельного столба. Показано поперечное сечение лавы по [32]

Вертикальное оседание $U_z(\xi, \eta)$ в произвольной точке мульды сдвижения определяется по формуле:

$$U_z(\xi, \eta) = Z_{max} \cdot S(\xi) \cdot S(\eta), \quad (4.14)$$

где Z_{max} – наибольшее оседание в главном сечении мульды сдвижения, мм. Горизонтальные сдвижения в произвольной точке мульды определяются по формулам:

– в направлении оси Ox :

$$U_x(\xi, \eta) = a_0 \cdot Z_{max} \cdot F(\xi) \cdot S(\eta) \quad (4.15)$$

– в направлении оси Oy :

$$U_y(\xi, \eta) = a_0 \cdot Z_{max} \cdot F(\eta) \cdot S(\xi) \quad (4.16)$$

Безразмерные функции $S(\xi)$, $S(\eta)$, $F(\xi)$ и $F(\eta)$, с помощью которых рассчитываются поля смещений земной поверхности, табулированы в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 – Значения безразмерных функций $S(\xi)$, $S(\eta)$ при столбовой системе разработки в зависимости от степени подработанности D_0/H [32]

ξ или η	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
S при $D_0/H=0.35$	1.0	0.94	0.79	0.59	0.38	0.22	0.13	0.07	0.03	0.01	0
S при $D_0/H=0.85$	1.0	0.95	0.82	0.62	0.41	0.25	0.13	0.07	0.03	0.01	0
S при $D_0/H=1.0$	1.0	0.96	0.85	0.67	0.46	0.28	0.15	0.07	0.03	0.01	0
S при $D_0/H \geq 1.4$ полная подработка	1.0	0.97	0.89	0.77	0.58	0.35	0.19	0.08	0.03	0.01	0

Таблица 4.2 – Значения безразмерных функций $F(\xi)$ или $F(\eta)$ при столбовой системе разработки в зависимости от степени подработанности D_0/H [32]

ξ или η	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
F при $D_0/H=0.5$	0	0.61	0.91	0.99	0.76	0.43	0.14	0.06	0.03	0.01	0
F при $D_0/H \geq 1.4$ (полная подработка)	0	0.24	0.51	0.78	0.96	1.00	0.87	0.59	0.27	0.05	0

Для модельной лавы были приняты следующие параметры: глубина лавы: $H = 600$ м; размер отработанного блока в направлении оси Oy : $D_0 = 260$ м; продвижение лавы: 900 м, что соответствует выработке примерно за полгода; $a_0 = 0.3$. Если задать вынимаемую мощность пласта равной 1.75 м, то, при указанных параметрах, максимальное оседание земной поверхности в активной стадии процесса сдвигения составит $Z_{max} = 700$ мм [32]. На рисунке 4.6 показаны расчетные оседания вдоль главных сечений мульды, рассчитанные при этих параметрах по формулам (4.14) – (4.16).

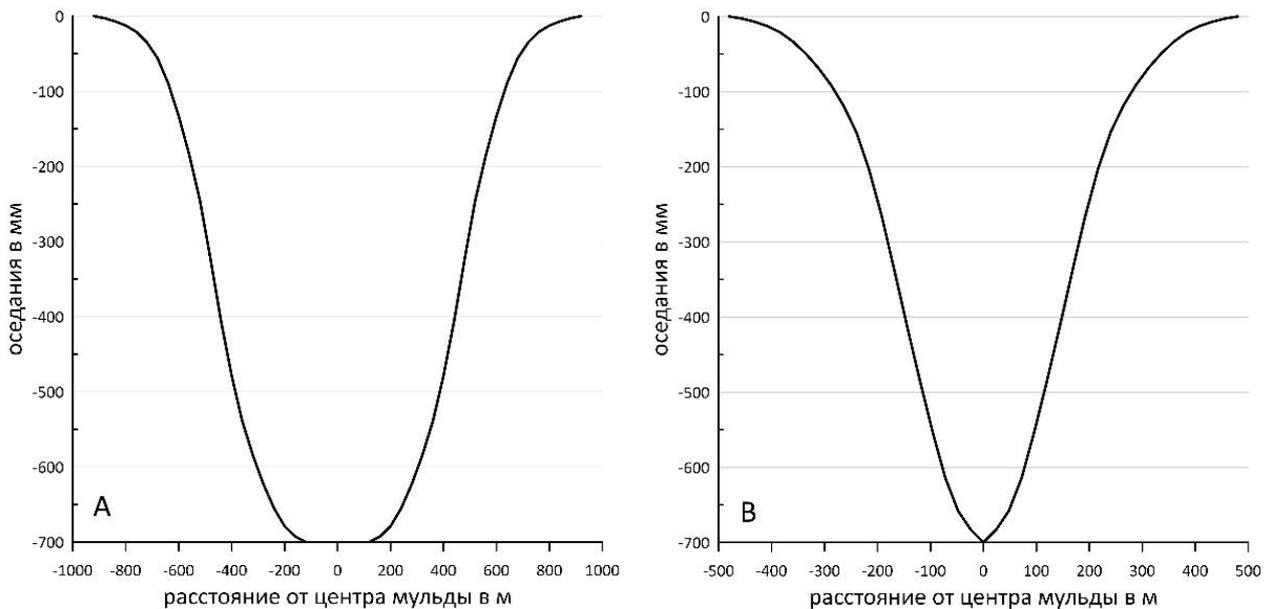


Рисунок 4.6 – Профили вдоль продольного (А) и поперечного (В) сечений мульды

4.2.3 Расчет теоретических смещений над горной выработкой по данным с одной или двух орбит

После того, как были оценены оседания вдоль главных сечений мульды согласно формулам (4.14)–(4.16), можно рассчитать поля теоретических компонент смещений – северной, восточной и вертикальной (U_N , U_E и U_Z соответственно) в зависимости от ориентации главных осей мульды. По формуле (4.1) можно вычислить теоретические поля смещений в направлении на спутник, которые будут получены при съемке области мульды с восходящей и нисходящей орбиты. Эти поля смещений были рассчитаны для восходящей и нисходящей орбиты с азимутами 350° и 190° и с углом видения 43.5° и 45.5° соответственно. Эти параметры соответствуют геометрии спутниковой съемки Старобинского месторождения в Республике Беларусь. Далее была рассчитана вертикальная компонента смещений U_Z , используя данные совместно с восходящей и нисходящей орбит по формуле (4.4), которая справедлива, если северная компонента смещений не превосходит смещения в других направлениях. В данной главе анализ восточной компоненты смещений U_E не проводился. Так же, с использованием теоретических полей смещений в направлении на спутник U_{LOS} , соответствующих съемке с восходящей и нисходящей орбиты, по формуле (1.7) были определены субвертикальные смещения U_{subv} . Результаты расчетов были сопоставлены с вертикальными смещениями U_Z , полученным по модели мульды по формулам (4.11)–(4.16).

На рисунке 4.7 А-В представлены карты вертикальной, восточной и северной компонент смещений U_Z , U_E и U_N для модели лавы, которая движется в направлении С-Ю. Максимальные оседания составляют 700 мм, максимальные горизонтальные сдвиги составляют 220 мм.

На рисунке 4.7 Г, Д показаны карты субвертикальных смещений, которые могут быть получены по данным съемки с восходящей или нисходящей орбиты. Видно, что длинная ось мульды оседания смещается в направлении к спутнику. Ближний по отношению к спутнику борт мульды более крутой, чем противоположный. Величина субвертикальных оседаний составляет 780 мм, что на 11% больше вертикальных смещений, показанных на рисунке 4.7 А.

На рисунке 4.7 Е приведены величины оседаний, которые рассчитаны нами с одновременным использованием снимков с восходящей и нисходящей орбиты. Ось мульды не смещена, максимальное оседание определено точно.

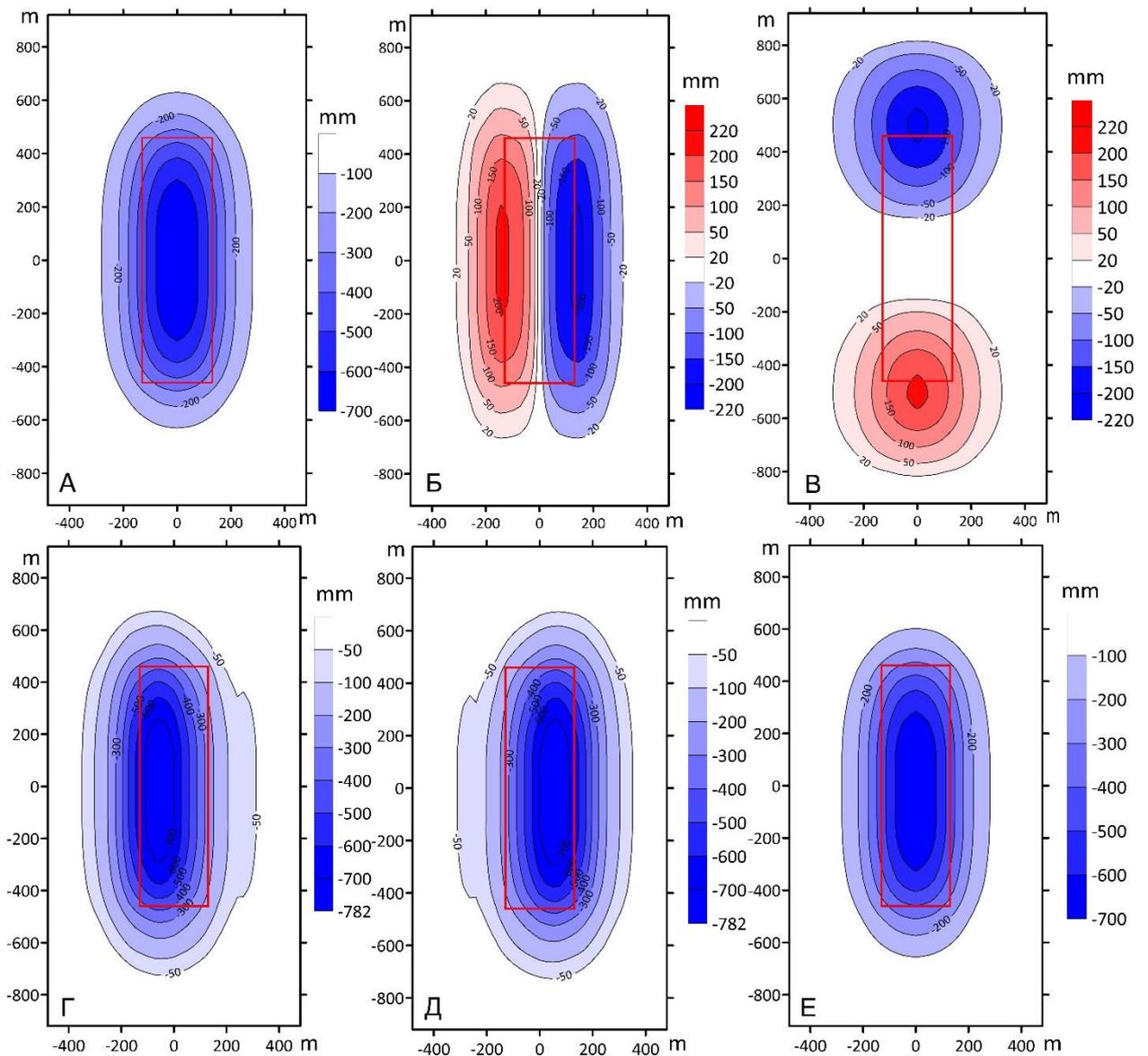


Рисунок 4.7 – Карты вертикальной (А), восточной (Б) и северной (В) компоненты смещений при движении лавы в направлении С-Ю и их сравнение с расчетами смещений в направлении на спутник и с двух орбит; Г – субвертикальные смещения (формула 1.7), полученные с восходящей орбиты; Д – то же с нисходящей орбиты; Е – вертикальные смещения, рассчитанные по данным

с двух орбит (формула 4.4). Красный прямоугольник – проекция выработанного пространства на дневную поверхность

4.2.4 Оценка погрешности определения смещений по данным с двух орбит

Расхождения вертикальных смещений, полученных с двух орбит, от модели мутьды, движущейся в направлении С-Ю, СЗ-ЮВ и З-В, показаны на рисунке 4.8. Видно, что погрешности возникают только на северном и южном борту мутьды, т.е. там, где имеются заметные смещения в направлении на север. Геометрия мутьды не зависит от направления ее движения.

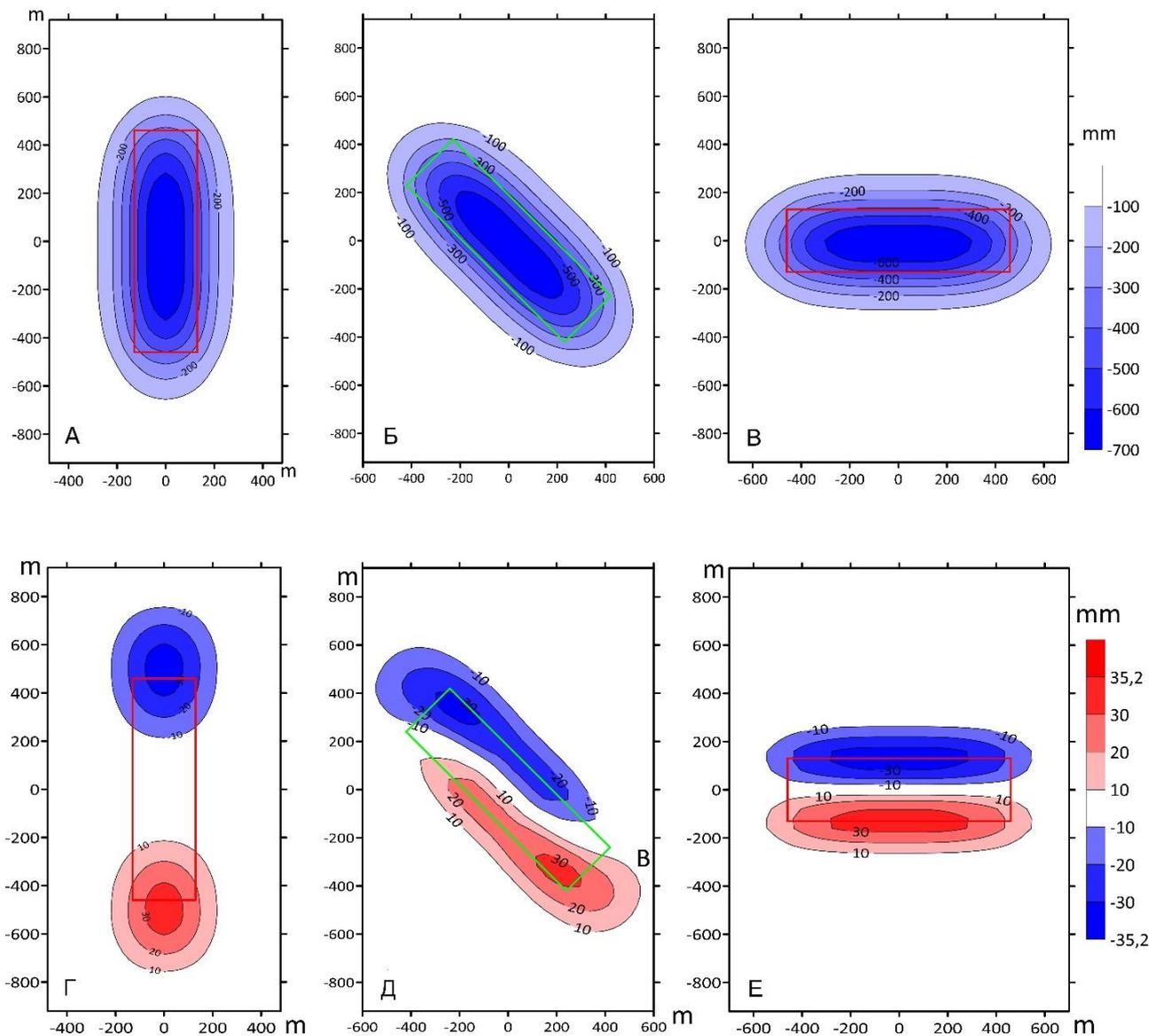


Рисунок 4.8 – Вертикальные смещения, рассчитанные по данным съемки с двух орбит, при движении лавы в направлении С-Ю (А), СЗ-ЮВ (Б) и З-В (В); Г-Е – разница расчетных смещений со смещениями модельной мутьды, рассчитанными по формулам (4.11–4.16)

Максимальная ошибка восстановления вертикальной компоненты во всех трех вариантах не превосходит 35 мм при максимальной величине оседаний в 700 мм, что находится на уровне точности спутниковой радарной интерферометрии.

4.2.5 Оценка погрешности определения смещений по данным с одной орбиты

Поскольку спутниковые снимки, полученные совместно с двух орбит, имеются не всегда, необходимо оценить ошибку в определении субвертикальных смещений, рассчитанных по данным либо по восходящей, либо по нисходящей орбите, используя формулу (1.7), при движении лавы в направлении С-Ю (рисунок 4.9). Область максимальных субвертикальных смещений, рассчитанных с восходящей орбиты, сместилась на запад (бордовые изолинии), т.е. к спутнику. Аналогично, область максимальных смещений, определенных с нисходящей орбиты, сместилась на восток, т.е. вновь к спутнику. Такое же соотношение сохраняется и для областей поднятия: центр поднятия на карте субвертикальных смещений всегда смещается к спутнику. Ближний к спутнику борт мульды более крутой, чем противоположный.

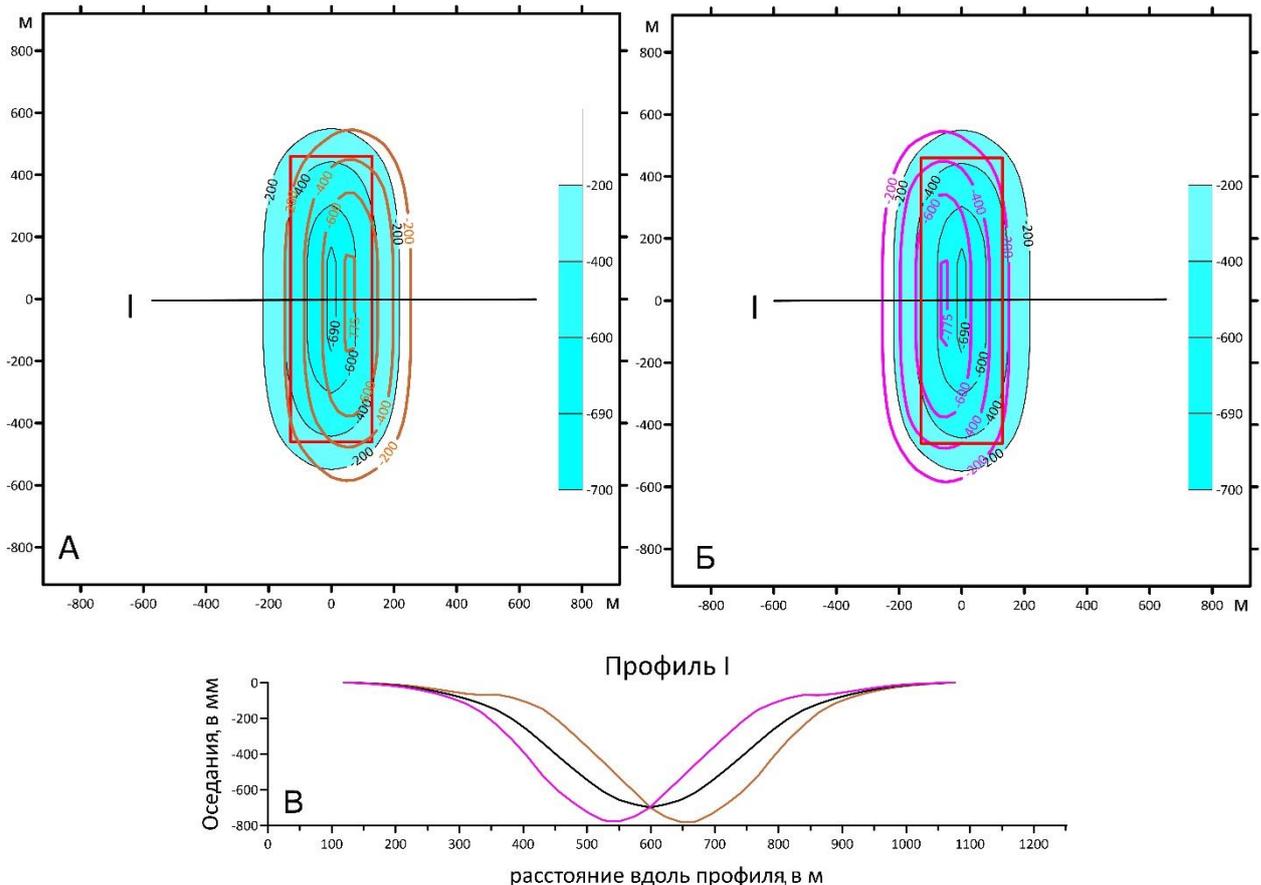


Рисунок 4.9 – Сопоставление вертикальных смещений по модели лавы и субвертикальных смещений (подписи изолиний указаны в мм), рассчитанных по данным с одной нисходящей (А) или восходящей (Б) орбиты. Лава движется в направлении С-Ю. На рисунке 4.9 В приведен

профиль вдоль поперечной оси мульды. Черные линии – модель, бордовые и коричневые линии – расчет с восходящей и нисходящей орбиты соответственно

Также было определено, как меняются расхождения расчетных и модельных данных в зависимости от направления движения мульды. На рисунке 4.10 приведены результаты для случая, когда мульда движется вдоль направления СЗ-ЮВ. Видно, что, как и в предыдущем примере, центр области субвертикальных оседаний смещен в направлении к спутнику на 50–60 м. Поскольку азимут восходящей орбиты составляет 350° (близок к полярной), то на карте субвертикальных смещений, полученной с восходящей орбиты (рисунок 4.10 А), область максимального оседания сместилась вдоль поперечной оси на ЮЗ и вдоль продольной оси на СЗ. Азимут нисходящей орбиты составляет 190° , поэтому на карте субвертикальных смещений, полученной с нисходящей орбиты (рисунок 4.10 Б), мульда сместилась вдоль поперечной оси на СВ и вдоль продольной оси на ЮВ. Величина субвертикальных смещений также несколько выше (760 мм), что на 9% больше вертикальных смещений в модели мульды.

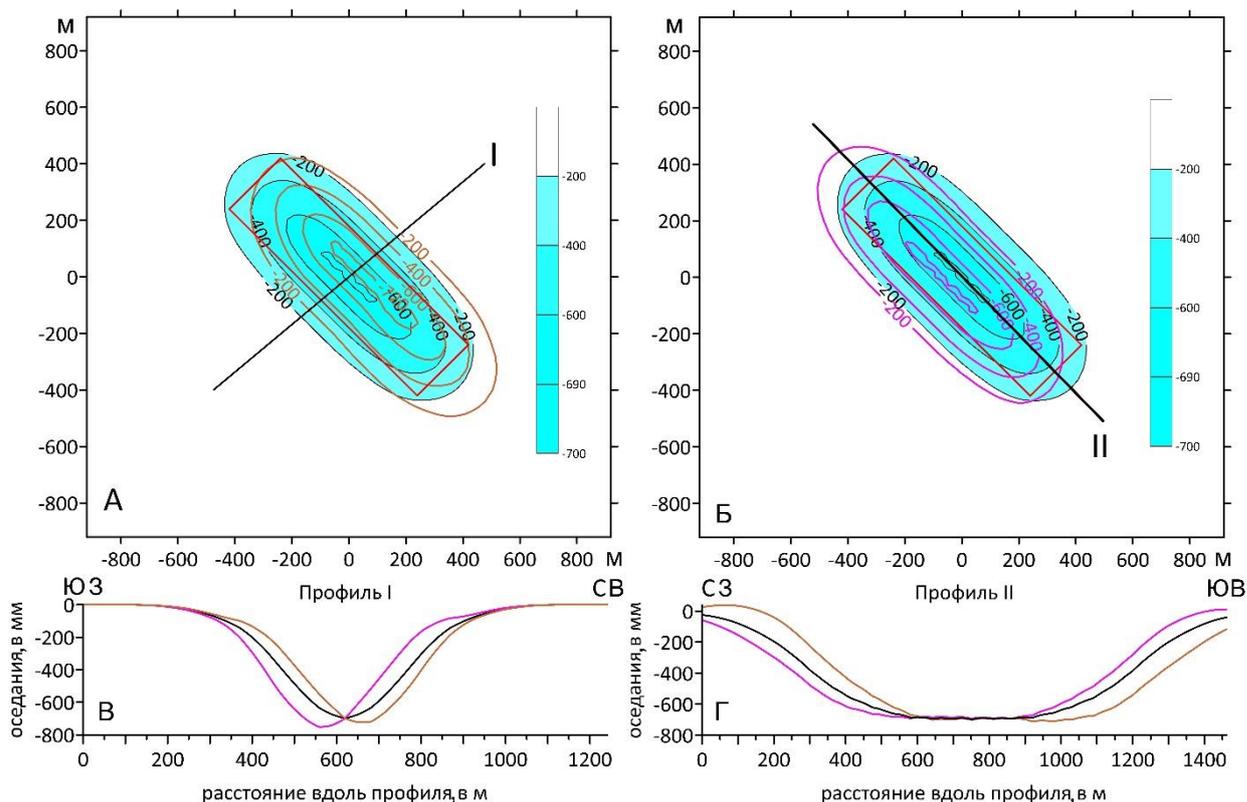


Рисунок 4.10 – Смещения области максимальных субвертикальных оседаний в данных с нисходящей (А) и восходящей (Б) орбит при движении мульды в направлении СЗ-ЮВ. Черным цветом показаны изолинии оседаний (мм) и графики вдоль профилей вдоль поперечной (В) и продольной (Г) оси мульды, рассчитанные по формулам (4.14–4.16). Бордовый график –

субвертикальные смещения, полученные с восходящей орбиты, коричневый цвет – то же с нисходящей орбиты

На рисунке 4.11 приведены аналогичные расчеты при движении мульды в направлении с запада на восток. На картах смещений на спутник U_{LOS} видно, что продольная ось мульды почти не смещена, а область максимального оседания по спутниковым данным сдвинулась в направлении к спутнику, т.е. вдоль продольной оси на запад на карте U_{LOS} с восходящей орбиты, и на восток – на карте U_{LOS} с нисходящей орбиты. Величина оседаний в центральной части мульды определена точно. Максимум субвертикальных оседаний сдвинул относительно центра мульды (рис. 4.11 Г), его величина составляет 780 мм, что на 11% больше вертикальных смещений для модели мульды.

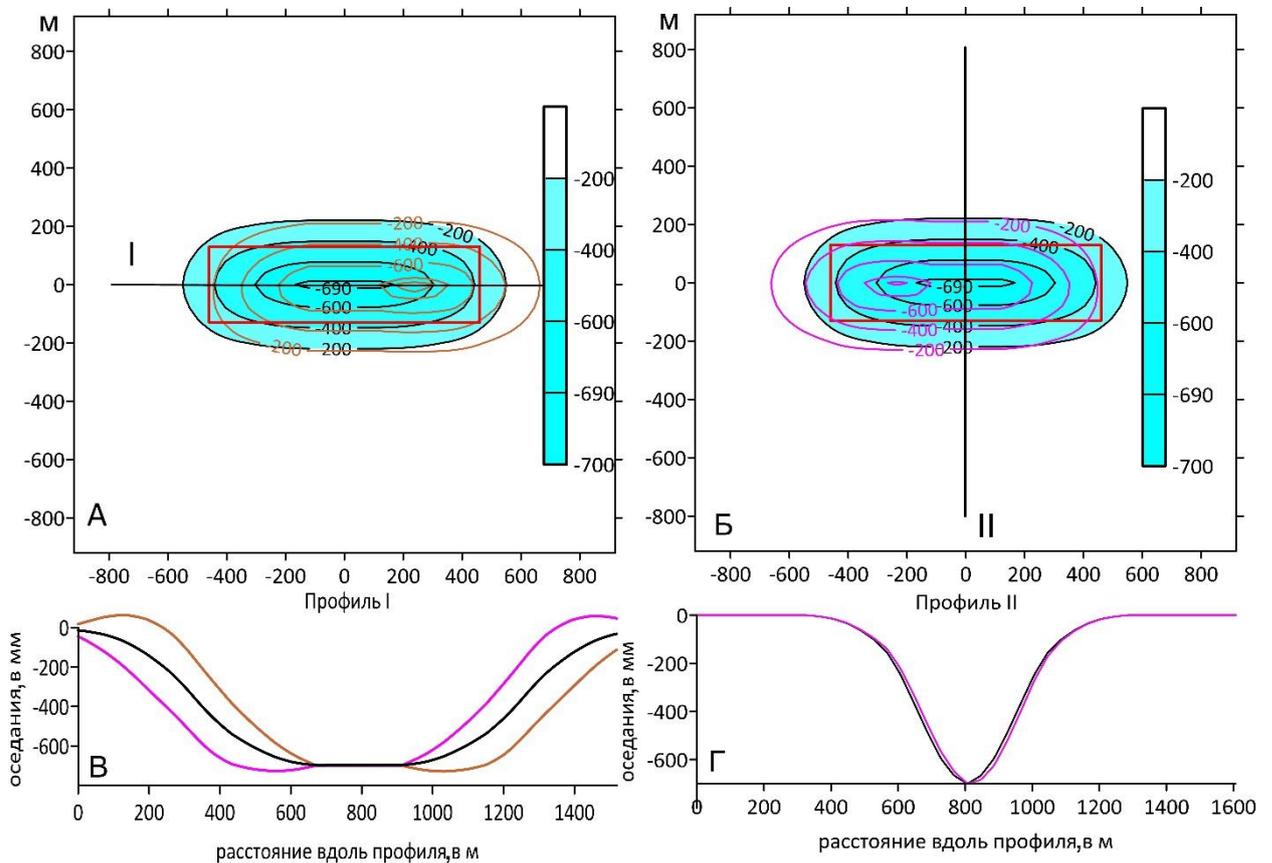


Рисунок 4.11 – Смещения области максимальных субвертикальных оседаний в данных с нисходящей (А) и восходящей (Б) орбит при движении мульды в направлении запад – восток. А – черными изолиниями показаны оседания по модели мульды, коричневые изолинии – субвертикальные оседания, рассчитанные по спутниковым данным с нисходящей орбиты. Б – то же для восходящей орбиты. В – профили оседаний вдоль продольной оси мульды (I). Г – то же, что В – для профиля II

4.2.6 Выводы по разделу 4.2

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

При расчетах с совместным использованием спутниковых данных с нисходящей и восходящей орбиты, продольная и поперечная ось мульды сдвижений не смещается. Максимальная величина смещений определяется почти без погрешности. Погрешности в восстановлении геометрии мульды появляются там, где имеется значительная северная компонента смещений. Для мульды простирания С-Ю и З-В – это северная и южная граница мульды, для мульды простирания СЗ-ЮВ – это ее самый северный и самый южный углы.

На картах смещений в направлении на спутник U_{LOS} , как и на картах субвертикальных смещений U_{subv} (они отличаются только по значениям, см. формулу 1.7), рассчитанных с одной орбиты, области оседаний и поднятий всегда смещаются в сторону к спутнику, т.е. на картах смещений, построенных по спутниковым снимкам с восходящей орбиты, на запад, а с нисходящей орбиты – на восток. Сдвиг оси мульды составляет 50-60 м.

Сдвиг осей мульды зависит от направления ее движения. Если мульда движется вдоль направления С-Ю, то ее продольная ось сдвигается на запад на картах субвертикальных оседаний U_{subv} , полученных с восходящей орбиты и на восток на картах U_{subv} , полученных с нисходящей орбиты, относительно ее положения на местности. Если мульда движется вдоль линии З-В, то ее продольная ось на картах субвертикальных оседаний не сдвигается, но область максимального оседания на карте U_{subv} сдвигается 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 движется в направлении СЗ-ЮВ, то на карте оседаний U_{subv} , полученной с восходящей орбиты, мульда сдвинется вдоль поперечной оси на ЮЗ и вдоль продольной оси на СЗ. На карте оседаний U_{subv} , полученной с нисходящей орбиты, мульда сдвинется вдоль поперечной оси на СВ и вдоль продольной оси на ЮВ. Сдвиг осей мульды относительно их истинного положения на местности следует учитывать при определении положения мульды оседания на местности по картам U_{subv} , полученным по снимкам с одной орбиты.

Максимум субвертикальных смещений, определенных по снимкам с одной орбиты, примерно на 10% больше, чем у смещений, рассчитанных по модели мульды.

В заключение отметим, что, если имеется достаточно детальная модель, описывающая геометрию мульды как функцию параметров разработки (глубина, размеры лавы, скорость ее движения и т.д.), то более надежным методом явится подбор параметров этой модели из условия наилучшего совпадения смещений, рассчитанных по этой модели и определенных по спутниковым данным с одной или нескольких орбит. Также при подборе можно учесть и данные наземной геодезии. В постановке решаемой при этом обратной задачи учитывается геометрия

съемки, что автоматически устраняет искажения, связанные со спутниковой съемкой наклонным лучом радиолокатора. Примеры реализации такого подхода можно найти в работах [16, 23, 24] и в других публикациях.

4.3 Выводы по главе 4

Результаты, приведенные в главе 4, обосновывают третье защищаемое положение: «Оценка точности расчета смещений земной поверхности над подземными хранилищами газа (ПХГ) и калийными рудниками по данным с одной и двух орбит с применением геомеханических моделей».

5. Применение дифференциальной интерферометрии и метода офсетов для исследования косейсмических и постсейсмических процессов в области землетрясения в Турции 6.02.2023 г.

5.1 Постановка задачи

Активные тектонические процессы в Восточном Средиземноморье обусловлены взаимодействием Африканской и Аравийской литосферных плит с Анатолийским блоком [49, 70, 80 и мн. др.]. Африканская и Аравийская плиты, двигаясь в сторону Евразийской плиты, вытесняют Анатолийский блок в западном направлении, движение которого происходит вдоль двух крупных сдвиговых разломов: правостороннего Северо-Анатолийского разлома и левостороннего Восточно-Анатолийского разлома [71]. Поскольку скорость движения Аравийской плиты больше, чем Африканской (18-25 мм/год и около 10 мм/год соответственно), то движение Анатолийского блока сопровождается вращением против часовой стрелки [70, 80, 93].

Граница между Анатолийским блоком и Аравийской плитой проходит по Восточно-Анатолийской зоне разломов (далее – ВАЗР) – одной из крупнейших внутриконтинентальных трансформных зон Восточного Средиземноморья (рисунок 5.1). На севере ВАЗР соединяется с Северо-Анатолийским разломом в районе г. Карлиова. В пределах ВАЗР выделяется целая система разломов. Далее, для удобства дальнейшего изложения, ВАЗР был условно разделен на три сегмента, из которых северный сегмент протягивается от г. Карлиова до г. Челикхан (Çelikhan). В районе г. Челикхан от ВАЗР в западном направлении уходит система разломов Сюргу-Чардак (Sürgü-Çardak), продолжение которой постепенно поворачивает на юго-запад и соединяется с зоной разломов Кирения (Κέρυνεια) в заливе Искендерун [47].

Центральный сегмент ВАЗР протягивается от г. Челикхан до г. Тюркоглу. Южный сегмент от г. Тюркоглу до г. Антакья совпадает с разломной зоной Карасу (Karasu), которая соединяется на юге с Кипрской дугой. На восток от зоны Карасу располагается Южно-Хатайская зона разломов, которая на юге соединяется с зоной разломов Мёртвого моря [74]. Между этими разломными зонами находится рифтовая зона Карасу, протяженностью 150 км и шириной примерно 25 км [74].

В течение последнего столетия вдоль ВАЗР происходили серии землетрясений в основном магнитудой M_w 3.5-6.4, а за последние десятилетия в этой зоне не наблюдалось значительного усиления сейсмичности, превышающей магнитуду M_w 6.7 [37, 93]. Среди последних событий отметим три землетрясения, произошедших в районе г. Сиврис, провинции Элязыг (Sivrice, Elazığ): Доганьол-Сиврис (Doğanyol-Sivrice) 24.01.2020 г. с магнитудой M_w 6.7, и два близко

расположенных события 4.08.2020 г. и 27.12.2020 г. с магнитудами M_w 5.6 и M_w 5.5 соответственно (данные Геологической службы США, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>). Эти землетрясения произошли в той части ВАЗР, куда вдоль этого разлома продвигалась область вспарывания во время главного события 6 февраля 2023 г. с M_w 7.8.



Рисунок 5.1 – Район катастрофических землетрясений в Турции 6.02.2023 г. (эпицентры отмечены звёздочками). Чёрные линии – система активных разломов по базе данных ГИН РАН (<http://neotec.ginras.ru/database.html>). Красными линиями показаны разломы, которые обсуждаются в тексте. Прямоугольные области – контуры спутниковых снимков Sentinel-1A, покрывающие эпицентры землетрясений (синий цвет – нисходящая орбита, зелёный – восходящая). В качестве топографической основы использована карта ESRI Shadow Relief (*Environmental System Research Institute*). Сегменты Восточно-Анатолийского разлома, обозначенные стрелками: Южная часть ВАЗР (г. Антакья – г. Тюркоглу), Центральная часть ВАЗР (г. Тюркоглу – г. Челикхан), Северная часть ВАЗР (г. Челикхан – г. Карлиова). На вставке в левом верхнем углу прямоугольником показано положение района исследования на карте Восточного Средиземноморья

6 февраля 2023 года на юге Турции произошла серия катастрофических землетрясений. По данным Геологической службы США, первое землетрясение магнитудой M_w 7.8 произошло в 01:17:34 (UTC), координаты гипоцентра 37.225° с.ш., 37.021° в.д., глубина гипоцентра 17.5 км. Через 9 часов, в 10:24:49 (UTC) произошло второе землетрясение магнитудой M_w 7.5, координаты гипоцентра 38.024° с.ш., 37.203° в.д., глубина гипоцентра 13.5 км. Эти землетрясения и их многочисленные афтершоки, локализованные в зоне ВАР, охватили 11 провинций в регионе суммарной площадью около 109 тыс. квадратных километров и стали самыми разрушительными в истории Турции. Общая протяженность поверхностного разрыва первого землетрясения составила 290 км, максимальные сдвиговые смещения достигли 5.5 м. Разрыв в результате второго землетрясения протянулся на 130 км. На участке к северу от Гельбаши до поселка Барыш максимальные сдвиги достигли 6 м (данные Министерства по чрезвычайным ситуациям Турецкой республики – AFAD). В связи с катастрофическими последствиями, детальное геологическое исследование столь протяженной очаговой зоны станет возможным очень нескоро. В этих условиях существенную помощь оказывают спутниковые данные, включая спутниковую радарную интерферометрию. Данные РСА-интерферометрии были использованы при изучении многих землетрясений. Пример изучения блоково-разломной структуры Южного Байкала после серии землетрясений приведен в [13]. В ИФЗ РАН ранее были выполнены работы по изучению землетрясений Тохоку-Оки (2011 г.), Мауле в Чили (2010 г.) и др. Модель поверхности разрыва землетрясений Тохоку-Оки (2011 г.) в Японии впервые построена с использованием комплекса данных о временных вариациях гравитационного поля, полей смещений земной поверхности по данным ГНСС, спутниковой радарной интерферометрии, и донных транспондеров [26]. Показано, что поверхность разрыва вышла на уровень дна в районе океанического желоба.

По комплексу данных о временных вариациях гравитационного поля, полей смещений земной поверхности по данным ГНСС и спутниковой радарной интерферометрии построена новая модель поверхности разрыва для землетрясения Мауле в Чили в 2010 г. [28]. С помощью этой модели доказано, что постсейсмические смещения связаны с постсейсмическим крипом, а гипотеза о пониженной вязкости астеносферы не подтверждается данными о постсейсмических смещениях [25].

Целью исследований, выполненных при участии автора, результаты которых изложены в работах [29, 30], являлось определение смещений земной поверхности, построение модели поверхности разрыва и определение косейсмических смещений на ней, а также анализ постсейсмических смещений.

5.2 Поля смещений по парным интерферограммам с двух орбит

Для проведения расчетов были использованы данные спутника Sentinel-1A, размер снимков которого составляет 200×250 км. Смещения оценивались по двум снимкам, полученным до и после 6 февраля 2023 года. Наилучший результат был получен при использовании снимков с нисходящей орбиты (азимут 189°), по снимкам от 29 января и 10 февраля 2023 года. По парным интерферограммам смещения определяются в направлении на спутник (U_{LOS}) и включают вертикальную и горизонтальную компоненты вектора смещений. По данным AFAD, на ВАЗР в период землетрясений преимущественно произошли сдвиговые смещения. В таких случаях эффективным является также метод офсетов. Ниже будут показаны результаты, полученные этими методами. На приведенных ниже картах положительными считаются смещения в направлении на восток, север и к спутнику.

Пусть β – угол между орбитой спутника и простиранием разлома. Угол отсчитывается от направления полета спутника по часовой стрелке (рисунок 5.2). Тогда смещения отражающей площадки перпендикулярно орбите – R , вдоль направления полета – A_z и в направлении на спутник U_{LOS} (положительные на восток, север и к спутнику) будут равны:

$$R = U_{SS} \cdot \sin \beta, A_z = U_{SS} \cdot \cos \beta; U_{LOS}^{asc} = U_{UP} \cdot \cos \theta - R \cdot \sin \theta;$$

$$U_{LOS}^{des} = U_{UP} \cdot \cos \theta + R \cdot \sin \theta, \quad (5.1)$$

где U_{SS} – величина сдвиговых, а U_{UP} – величина вертикальных смещений на бортах разломов; θ – угол наклона луча радиолокатора. (В интерферометрии принято, что смещения положительны в направлении полета и наклонной дальности, т.е. от спутника (рисунок 5.2). Для удобства сравнения результатов, полученных с различных орбит, формулы (5.1) написаны так, что положительными всегда являются смещения на восток и север. Поэтому в формуле для расчета U_{LOS} знак меняется в зависимости от направления полета).

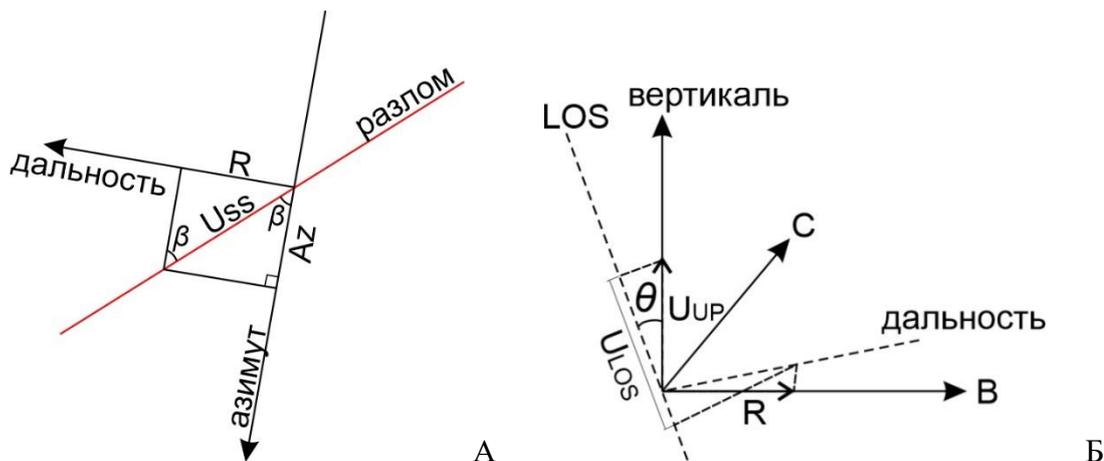
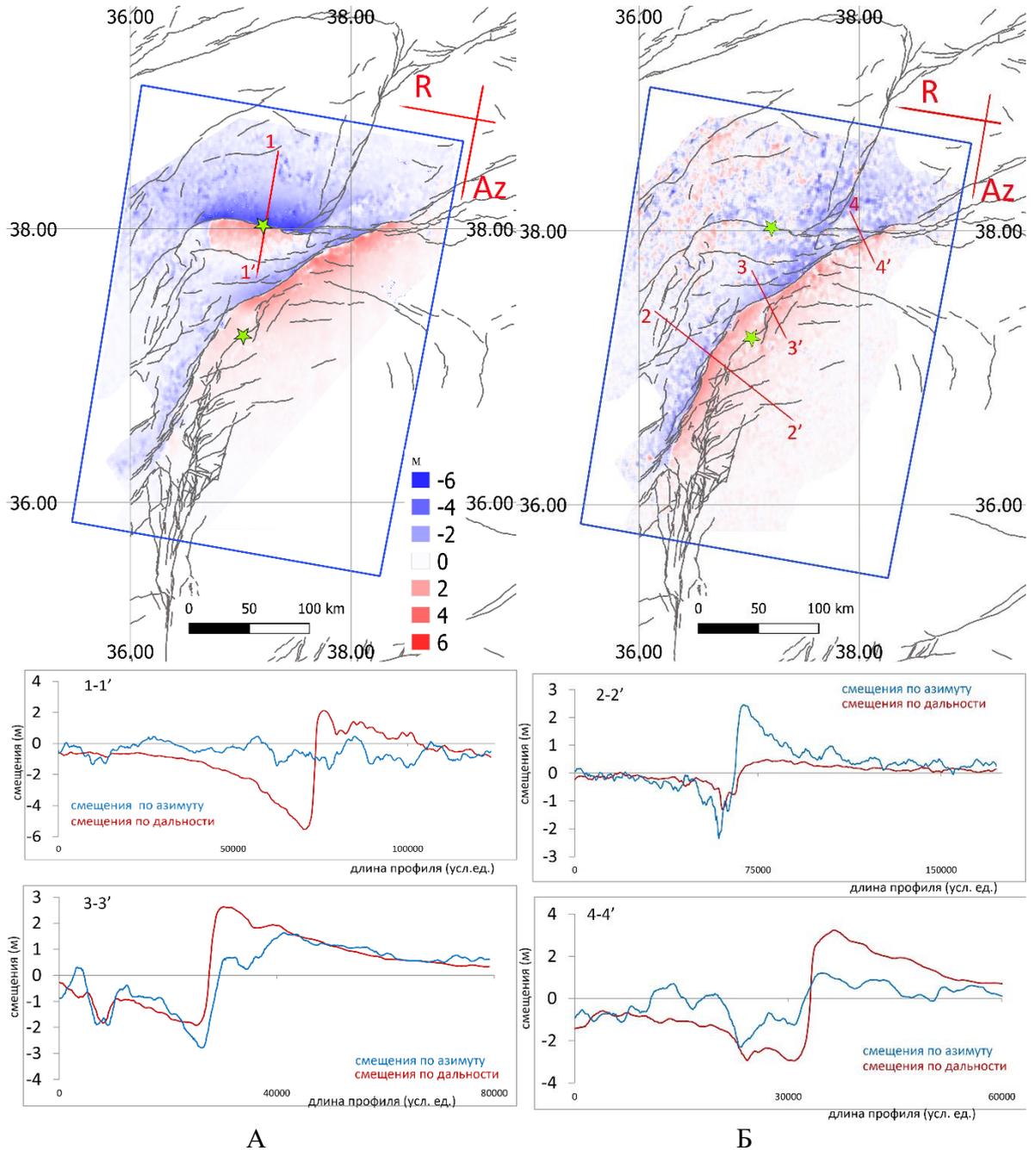


Рисунок 5.2 – К расчету компонент вектора смещений: А – сдвиговых; Б – вертикальных

5.2.1 Поля смещений, полученные методом офсетов с двух орбит

По двум снимкам с нисходящей орбиты (выполненных 29.01.2023 г. и 10.02.2023 г.), методом офсетов получены карты смещений в направлениях дальности и азимута (рисунок 5.3 А, Б). Суть метода офсетов изложена в главе 1.



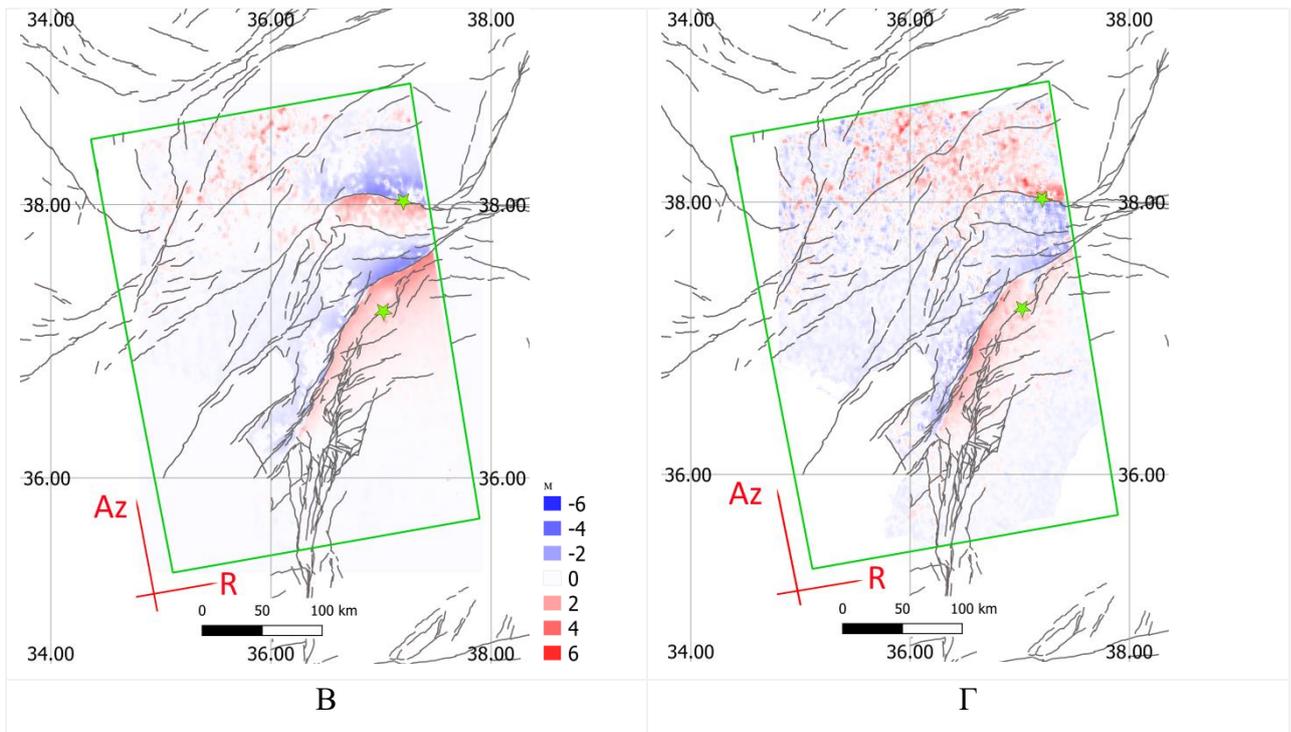


Рисунок 5.3 – Смещения земной поверхности (в метрах), рассчитанные методом офсетов, в направлении дальности (А) и азимута (Б) по спутниковым снимкам с нисходящей орбиты. Ниже указаны графики смещений в направлении дальности (красный цвет) и азимуту (синий цвет) вдоль выбранных линий профилей. Внизу – смещения по снимкам с восходящей орбиты, также в направлении дальности (В) и азимута (Г). Для удобства сравнения смещения положительными считаются смещения по азимуту в северном направлении и в направлении наклонной дальности – на восток. На картах указано направление нисходящей орбиты – азимут (A_z) и перпендикуляр к ней – дальность (R). Зеленые звезды – эпицентры главных землетрясений, произошедших 6.02.2023 г.

Отметим, что горизонтальные смещения будут наиболее четко проявляться там, где векторы смещений и направление измерений (азимут или дальность) коллинеарны. Так, на разломе Сюргу-Чардак, в эпицентральной зоне землетрясения с M_w 7.5, смещения по дальности фиксируются очень четко (рисунок 5.3 А), в то время как в этой же области, смещения, измеренные по азимуту, не превышают уровня шумов (рисунок 5.3 Б). На профиле 1-1' видно, что максимальная величина смещений по дальности на разломе Сюргу-Чардак превосходит 7 м.

На южном отрезке ВАЗР, от г. Тюркоглу до г. Антакья, смещения по дальности существенно меньше реальных смещений, особенно в зоне рифта Карасу. Поскольку направление простираения разломов в этой области близко к траектории нисходящей орбиты (максимальный угол, который образует Восточно-Хатайский разлом с азимутом орбиты спутника, не превышает 6°), то в этой области смещения в азимутальном направлении, показанные на рисунке 5.3 Б, практически соответствуют реальным. В районе профиля 2-2'

величина смещений, полученных по азимуту, превышает 4 метра, а по дальности она как минимум в два раза меньше (рисунок 5.3 Б).

Смещения на центральном сегменте ВАЗР, от г. Тюркоглу до г. Челикхан, более четко проявляются в направлении дальности. Максимальные величины смещений, измеренные по дальности, на этом сегменте возрастают от 4.5 до 6 метров при движении вдоль разлома на северо-восток к г. Челикхан (профили 3 и 4 на рисунке 5.3 Б). Поле смещений по азимуту в этой области имеет малое отношение сигнал/шум.

Зная смещения по азимуту и дальности, можно по формулам (5.1) рассчитать модуль вектора горизонтальных смещений и его направление (рисунок 5.4). Эти величины уже не зависят от геометрии съемки. Из рисунка 5.4 следует, что смещениям более 1 метра подверглась значительная часть Восточной Турции. Максимальные сдвиговые смещения произошли на разломе Сюргу-Чардак, а также на центральном и северном участках ВАЗР. Здесь смещения превосходили 5 м. Стрелки показывают направления 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.

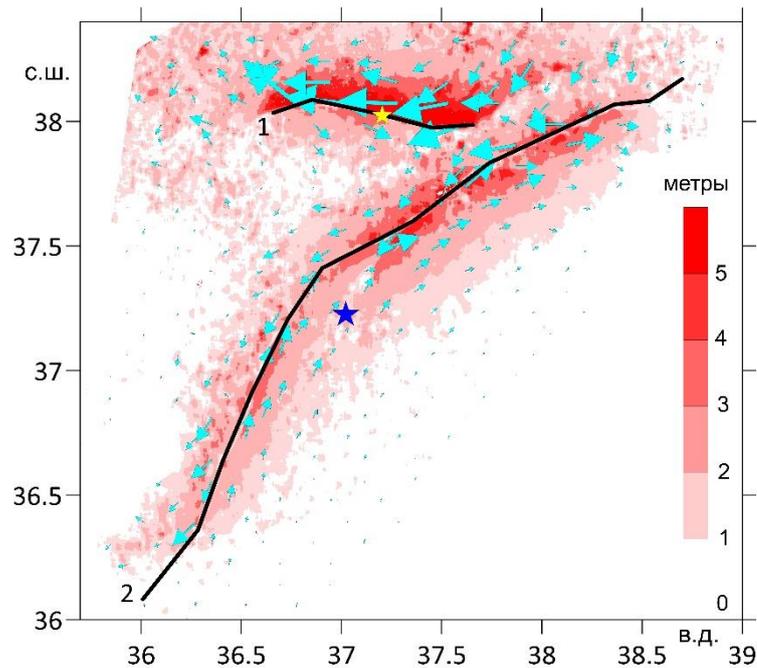


Рисунок 5.4 – Величины векторов смещений земной поверхности (цветовая шкала, в метрах) и направления горизонтальных смещений (стрелки). Наибольшая стрелка соответствует смещению в 5.22 м. Черные линии проведены вдоль поверхностей разрыва. Звездами показаны эпицентры главных землетрясений, произошедших 6.02.2023 г.

5.2.2 Поля смещений, полученные методом DInSAR с двух орбит

По парной интерферограмме можно вычислить смещения в направлении на спутник U_{LOS} , которые можно разложить на вертикальную и горизонтальную компоненты (формула 5.1). Поскольку в результате произошедших землетрясений в основном возникли горизонтальные смещения, то, приняв вертикальную компоненту U_{UP} , равную нулю, можно рассчитать сдвиговые смещения по дальности:

$$R^{asc} \approx -U_{LOS}^{asc} / \sin \theta; \quad R^{des} \approx U_{LOS}^{des} / \sin \theta \quad (5.2)$$

Угол отклонения направления распространения радарного сигнала от вертикали θ в период съёмки территории, покрываемой снимками с нисходящей орбиты от 29.01.2023 г. и 10.02.2023 г., менялся от 30° до 46° , от восточной границы снимка к западной. Поскольку этот угол известен для каждой отражающей площадки, смещения U_{LOS} можно пересчитать в смещения по дальности и сопоставить их с результатами, полученными методом офсетов (рисунок 5.5). Эти смещения хорошо совпадают, за исключением приразломных зон, поскольку в этих областях развертка фазы может не выполняться или дать сглаженные значения. Наибольшие различия получены на профиле 2-2', проходящем через долину Гельбаши [90]. Здесь область положительных смещений в направлении на спутник располагается по обе стороны от ВАЗР (рисунок 5.5), в то время как на картах смещений по дальности (рисунок 5.3) смещения при пересечении ВАЗР меняют знак. Расхождения могут быть связаны с ошибками развертки фазы, поскольку в долине располагаются два крупных водоема, поверхность которых имеет близкую к нулю когерентность. Часть имеющихся расхождений может быть связана с наличием вертикальной составляющей в смещениях, которыми при выводе формулы (5.2) пренебрегли.

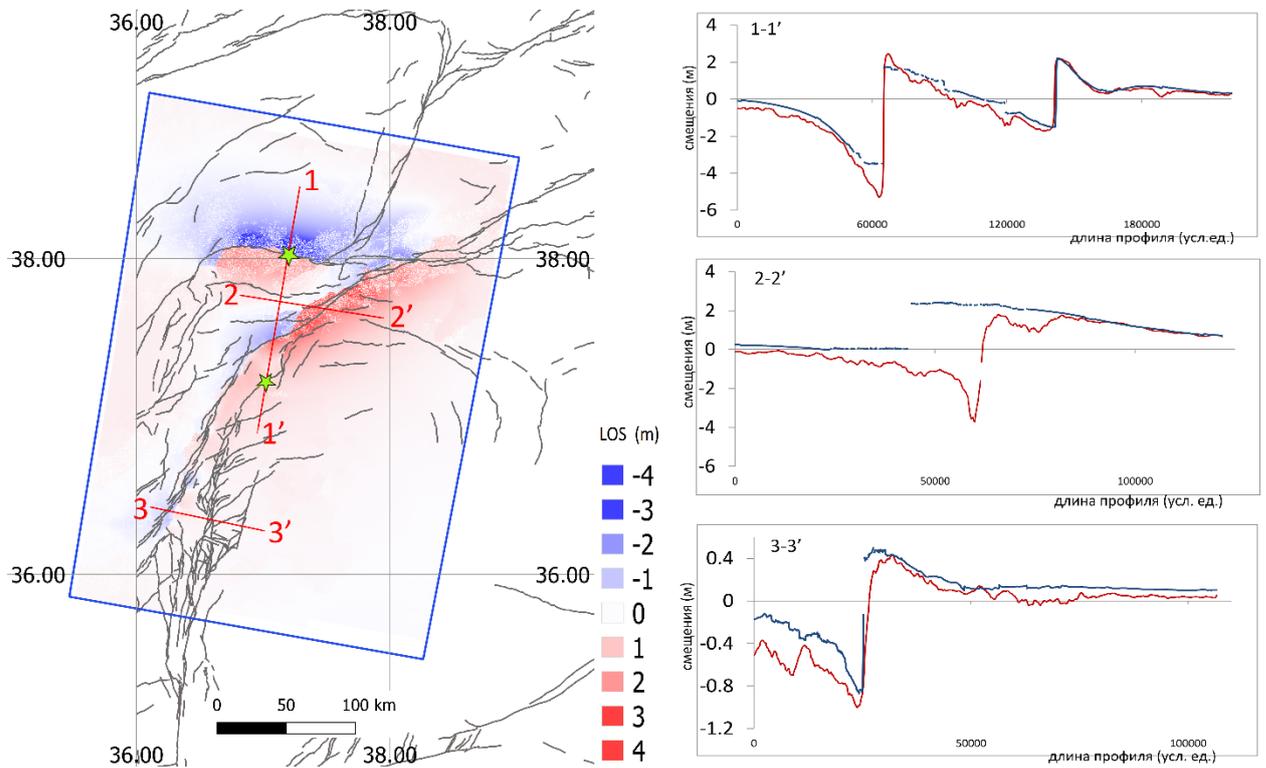


Рисунок 5.5 – Сравнение смещений (в метрах), рассчитанных в направлении дальности методом офсетов и смещений, полученных по парной интерферограмме методом DInSAR и пересчитанных в смещения в направлении дальности по формуле (5.2). Слева – карта смещений в направлении на спутник, полученная с нисходящей орбиты. На профилях справа, вдоль линий, показанных красным на карте: синий цвет – смещения U_R , рассчитанные по U_{LOS} ; красный цвет – смещения по дальности, рассчитанные по методу офсетов

Постсейсмические смещения, рассчитанные методом DInSAR, по двум снимкам с нисходящей орбиты от 10.02.2023 г. и 22.02.2023 г. показали, что значительных смещений на разломах в этот период больше не наблюдалось, за исключением области района Антакья, где 20.02.2023 г. произошло землетрясение магнитудой M_w 6.3 с эпицентром в точке с координатами 36.154N, 36.037E (данные Геологической службы США, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>). На рисунке 5.6 эпицентр этого землетрясения отмечен красной звездой. Максимальные смещения в направлении LOS , от спутника, составили -16 см (профиль 2). Эпицентр находится в юго-западной части области смещений от спутника («оседаний»). По геометрии поля смещений можно заключить, что смещения произошли вдоль нодальной плоскости с простиранием 225° и падением 53° (данные Геологической службы США, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>). Угол подвижки по сейсмологическим данным равен -27° , что соответствует левостороннему сдвигу со сбросовой компонентой.

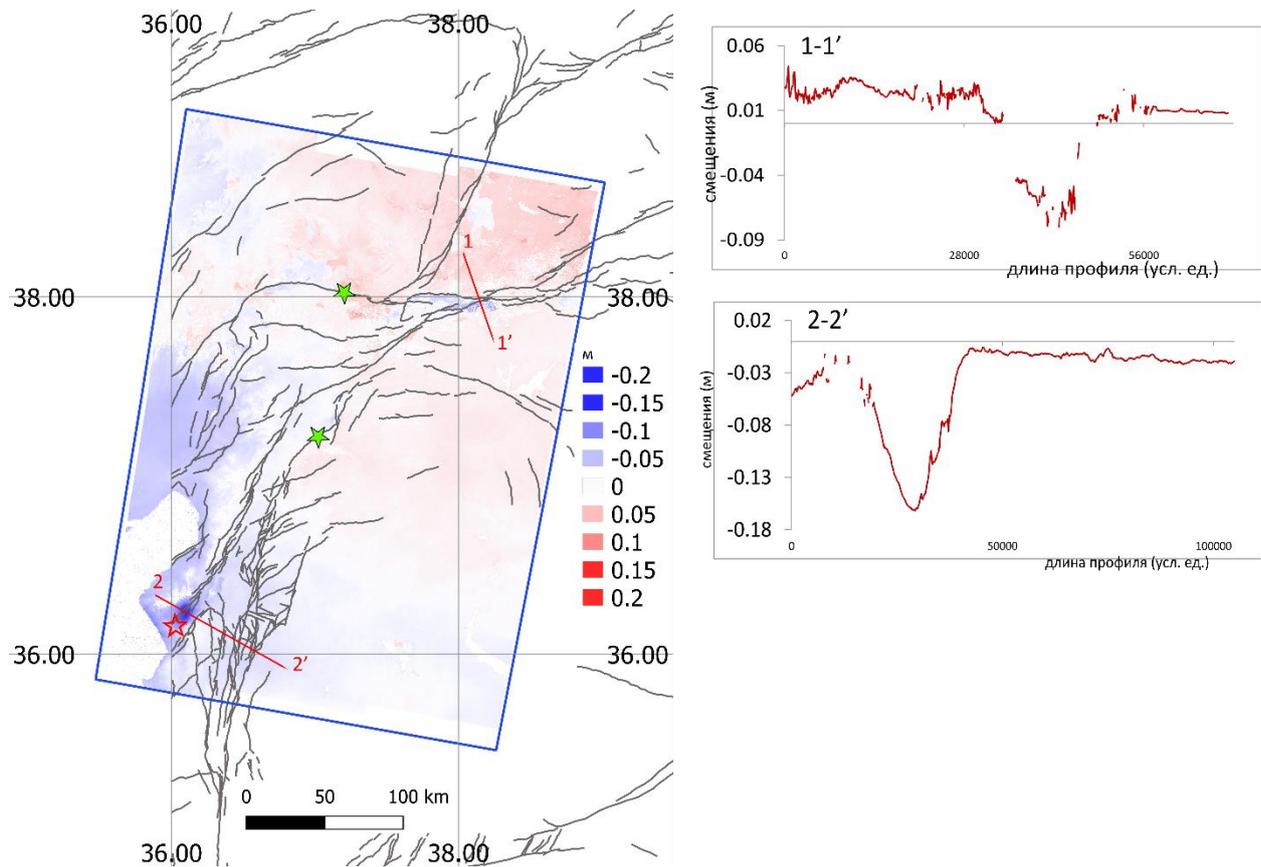


Рисунок 5.6 – Постсейсмические смещения (в метрах) на карте и вдоль профилей, показанных красными линиями, полученные методом DInSAR в направлении LOS по снимкам Sentinel-1A от 10.02.2023 г. и 22.02.2023 г. Звёздами обозначены эпицентры землетрясений: зелёные – 6.02.2023 г. (M_w 7.8, M_w 7.5), красная – 20.02.2023 г. (M_w 6.3)

В области, где разлом Сюргу-Чардак подходит к центральному сегменту ВАЗР, получены смещения величиной до 10 см. Смещения во время землетрясения здесь были небольшие. Возможно, что на постсейсмическом этапе разлом немного продвинулся на восток.

5.3 Моделирование поверхности сейсмического разрыва

Используя спутниковые снимки территории Турции, были получены следующие данные смещений на ВАЗР: поля смещений по направлениям азимута A_z и дальности R с нисходящей и восходящей орбит (методом офсетов); поле смещений в направлении на спутник U_{LOS} (методом DInSAR). В целом полученные поля смещений хорошо согласуются. Поле U_{LOS} может содержать неточности вследствие проблем с разверткой фазы в области больших величин смещений. Смещения, полученные методом офсетов по снимкам с восходящей орбиты, имеют меньшее отношение сигнал/шум, чем смещения, полученные по снимкам с нисходящей орбиты. Таким образом, для моделирования были выбраны данные с максимальным отношением сигнал/шум:

для северной части исследуемой области (севернее 37.4° с.ш.) использовались смещения в направлении дальности с нисходящей орбиты, а южнее 37.0° с.ш. были использованы азимутальные смещения, также полученные по данным съемки с нисходящей орбиты, в обоих случаях для их вычисления использовался метод офсетов.

Трасса сейсмических разрывов на дневной поверхности (черные линии на рисунке 5.4) была построена по данным базы разломов [12] 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 5.7), 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 [34], падение в северо-западном направлении под углом 85° согласно [12, 35]. 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 5.7 этот 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 [77].

Итак, поверхность разрыва аппроксимирована 57-ю прямоугольными элементами по падению и простиранию. Компоненты вектора смещений в каждом элементе по падению и простиранию D_i и S_i являются неизвестными. Эти параметры входят в уравнения изотропной упругой среды линейно: сумма решений от набора плоскостей равна сумме решений от каждой плоскости, поэтому смещения на элементах, аппроксимирующих поверхность разрыва, находятся путем решения соответствующей линейной обратной задачи [22].

Важным ограничением на получаемые решения является условие на направление подвижки на каждом элементе поверхности сейсмического разрыва. Угол подвижки определяется как $rake_i = tg(D_i/S_i)$, и может быть задан из решения механизма очага. Включение в функционал обратной задачи условия близости угла подвижки к заданному углу, делает задачу нелинейной и сводит ее решение к перебору по всем допустимым углам. Для

сохранения линейности обратной задачи в работах [26, 45] была предложена такая форма регуляризирующего функционала обратной задачи:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{N_1+N_2} \left(\sum_{j=1}^{N_1} (R_j - \sum_{i=1}^K (D_i \cdot r_{i,j}^d + S_i \cdot r_{i,j}^s))^2 + \sum_{j=1}^{N_2} (Az_j - \sum_{i=1}^K (D_i \cdot a_{i,j}^d + S_i \cdot a_{i,j}^s))^2 \right) + \\ & + \frac{\beta}{K} \sum_{i=1}^K (D_i \cos(\text{rake}) - S_i \sin(\text{rake}))^2 + \\ & + \frac{\gamma}{K} (\sum_{i=1}^K (D_i - \bar{D})^2 + \sum_{i=1}^K (S_i - \bar{S})^2) = \min. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Здесь исходные данные: R_j – значения смещений (метры) в направлении наклонной дальности в N_1 точках по данным РСА-интерферометрии в северной части области (севернее 37.4° с.ш.), Az_j – значения смещений (метры) в азимутальном направлении в N_2 точках по данным РСА-интерферометрии в южной части области (южнее 37.0° с.ш.). Неизвестные величины: D_i и S_i – смещения по падению и простиранию (метры) на $K=58$ элементах разбиения поверхности сейсмического разрыва. Расчетные величины: $r_{i,j}^d$ и $r_{i,j}^s$ – смещения в направлении наклонной дальности (метры), рассчитанные от единичного смещения по падению (индекс d) и простиранию (индекс s) на прямоугольном элементе i в точку задания смещений в направлении наклонной дальности с индексом j (таких точек N_1). Аналогично, $a_{i,j}^d$ и $a_{i,j}^s$ – смещения в азимутальном направлении (метры), рассчитанные от единичного смещения по падению (индекс d) и простиранию (индекс s) на элементе i в точку задания смещений в азимутальном направлении с индексом j (таких точек N_2). Параметры β и γ определяют вес условия на угол подвижки. Условие при коэффициенте β требует, чтобы угол подвижки был близок к заданному направлению подвижки *rake* (в данном случае мы использовали условие близости угла подвижки к чистому сдвигу на всех элементах поверхности разрыва). Однако этому условию соответствуют два угла, различающиеся на 180° . Поэтому, если в решении возникают смещения в противоположных направлениях, что не соответствует физическим представлениям, то следует увеличить коэффициент γ , стоящий при условии, что смещения на каждом элементе в направлении простирания и падения по отдельности должны быть близки к средним значениям смещений по падению \bar{D} и по простиранию \bar{S} по всей поверхности разрыва. Практика показывает, что это условие эффективно устраняет смещения в противоположных направлениях. Решение задачи начинается с нулевыми коэффициентами β и γ . Если получены смещения в противоположных направлениях, величина этих коэффициентов понемногу увеличивается, до выравнивания направлений смещения. Решение получено при небольших значениях весов $\beta = \gamma = 0.1$.

В функционал можно включить и другие имеющиеся данные, например, глобальных навигационных спутниковых систем GPS и/или ГЛОНАСС, для крупных землетрясений временные вариации гравитационного поля по данным спутников GRACE [26].

На приведенной на рисунке 5.7 модели поверхности разрыва, стрелки указывают направления смещений на висячем крыле разлома. Для ВАЗР падение было задано на северо-запад под углом 85° . Результаты меняются слабо, если задать падение на юг с таким же углом, как это сделано в построенной по сейсмологическим данным модели USGS.

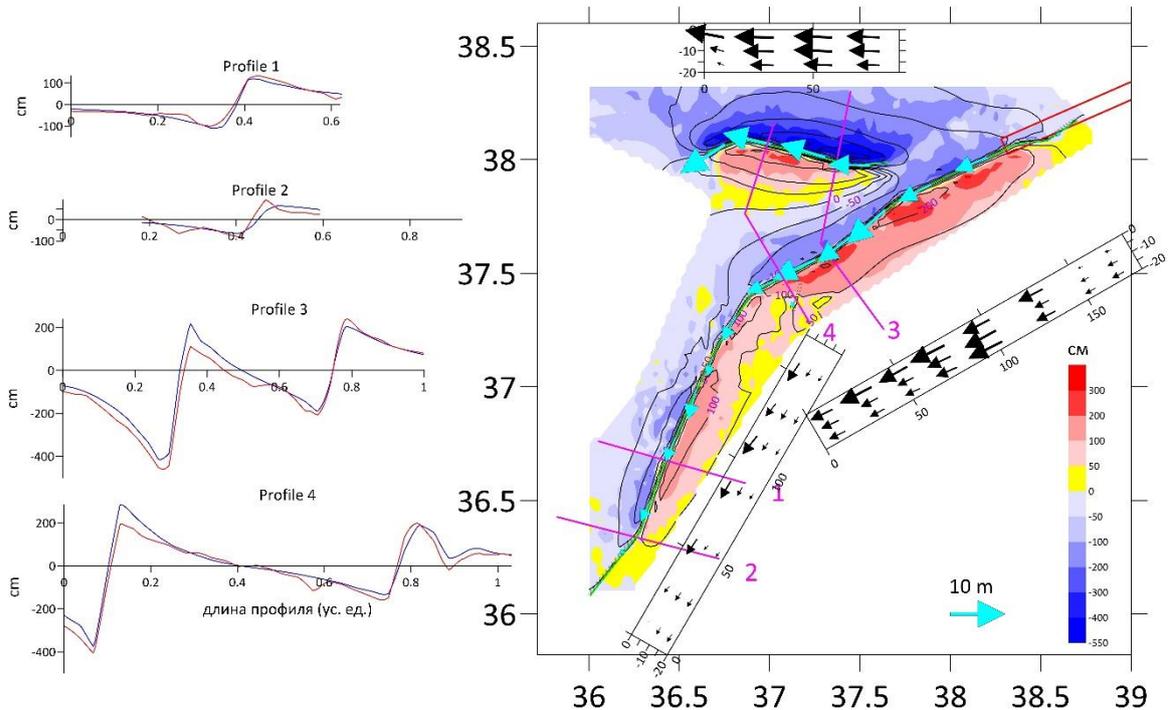


Рисунок 5.7 – Модель поверхности разрыва землетрясений 6.02.2023 г., построенная по данным РСА-интерферометрии. Цветовая карта – смещения земной поверхности по дальности (в см), определенные методом офсетов по снимкам с нисходящего трека. Черные изолинии – те же смещения, рассчитанные по модели. Черные 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, она 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)

На южном сегменте ВАЗР смещения монотонно увеличиваются с юга на север. На самом южном элементе смещения в нижней части оценены в 2.0 м, а в верхней – менее 0.11 м. Именно здесь 20.02.2023 г. произойдет землетрясение магнитудой M_w 6.3 (рисунок 5.6), гипоцентр которого располагался на глубине 11.5 км, т.е. в верхней части среднего уровня модели.

Далее, на север, величина смещений в верхней части южного сегмента сейсмического разрыва увеличивается до 5.8 м, в средней части – до 2.5 м, в нижней части – не более 1.5 м.

На центральном сегменте ВАЗР, где его простирание поворачивает на север – северо-восток, величина смещений на сейсмическом разрыве существенно увеличивается. Смещения на отдельных элементах поверхности разрыва превосходят 10.2 м. На северном сегменте смещения убывают, но все же на нижнем уровне самого северного участка они составляют 3.4 м. Юго-восточное окончание модели сейсмического разрыва землетрясения Доганьол-Сиврис (Doğanyol-Sivrice), произошедшее 24.01.2020 г. магнитудой M_w 6.7, опубликованной на сайте USGS (красный прямоугольник на рисунке 5.7), перекрывается с третьим с севера элементом рассчитанной нами модели, где смещения на верхнем уровне составляют 6.8 м.

На трех восточных сегментах сейсмического разрыва вдоль разлома Сюргу-Чардак произошли чисто сдвиговые смещения, а на западном его элементе добавляется и надвиговая компонента – там, где разрыв поворачивает южнее (рисунок 5.7). Смещения в верхней части разрыва возрастают с востока на запад. На нижних уровнях разрыва более интенсивные смещения произошли в восточной части.

Смещения на небольшом разломе, на котором начались катастрофические сейсмические события 6.02.2023 г., оценены в 2.1 м.

5.4 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. Наиболее чёткие смещения получены методом офсетов по снимкам с нисходящей орбиты. Смещения на разломе Сюргу-Чардак, а также на центральном сегменте, от г. Кахраманмараш (район эпицентра M_w 7.8) на северо-восток до г. Челикхан, и северном сегменте ВАЗР, наиболее детально определяются в направлении дальности (рисунок 5.3 А). Вдоль южного сегмента ВАЗР, простирающегося на юг – юго-запад от эпицентра главного события M_w 7.8 до побережья, более четко определяются смещения в направлении азимута (рисунок 5.3 Б). Из имеющегося набора данных для построения модели были выбраны данные с максимальным отношением сигнал/шум: для северной части области, выше 37.4° с.ш. – смещения по дальности, полученные методом офсетов с нисходящей орбиты, а южнее параллели 37.0° с.ш. – смещения по азимуту с той же нисходящей орбиты.

При построении модели использовано решение [77], построенное для сферической, радиально расслоенной модели планеты. В этой работе показано, что игнорирование

сферической расслоенности планеты приводит к ошибкам до 20%, при этом наибольшие ошибки возникают при наличии большой сдвиговой компоненты, т.е. именно в нашем случае. Также ошибку вносит и игнорирование сферичности при использовании решения в рамках идеализации упругого однородного полупространства [73], на основе которой построены модели USGS и [34].

Отличием полученной модели от модели USGS является более детальная геометрия поверхности сейсмического разрыва. Разрыв был аппроксимирован 19-ю прямоугольными элементами по простиранию, поделенными на три уровня по падению. Согласно полученной модели, сдвиговые смещения на центральном сегменте сейсмического разрыва вдоль ВАЗР достигают 10.2 м. На южном сегменте этого разрыва смещения существенно меньше. Следует подчеркнуть, что смещения земной поверхности получены за период между съемками (29 января и 10 февраля 2023 г.), т.е. включают еще и постсейсмические смещения за 4 дня после основных сейсмических событий.

В рассчитанной модели, как и в модели поверхности разрыва, опубликованной на сайте USGS и в [34], на южном участке ВАЗР смещения возрастают с юга на север и в основном концентрируются в верхней части земной коры до глубины в 10 км. На южном окончании этой части разрыва, где 20.02.2023 г. произошло землетрясение магнитудой $M_w 6.3$ с глубиной гипоцентра 11.5 км, на нижних уровнях рассчитанной модели получены смещения до 2 м, а на верхнем уровне смещений почти нет (11 см).

Область наиболее интенсивных смещений на ВАЗР фиксируется на ее центральном сегменте. Смещения во всех моделях здесь уходят на глубину и в рассчитанной модели достигают 10.2 м, что согласуется и с моделью [34], и с моделью USGS, по которым смещения составляют 11 м.

Отметим, что северное окончание полученного нами разрыва на ВАЗР перекрывается с южным окончанием модели поверхности разрыва землетрясения Доганьол-Сиврис 24.01.2020 г. с $M_w 6.7$, приведенной на сайте USGS. Южное окончание модели USGS расположено в пределах третьего с севера элемента построенной нами модели, где смещения на нижнем уровне равны 5.3 м, на среднем – 3.3 м, на верхнем – 6.5 м. В модели [34] в этой области смещения невелики, что позволило авторам сделать вывод о том, что здесь находится сейсмическая брешь и существует опасность нового землетрясения. Построенная в диссертационной работе модель не подтверждает это заключение, поскольку именно на южном окончании поверхности разрыва землетрясения Доганьол-Сиврис 24.01.2020 г. величины смещений в нашей модели резко возрастают.

Во всех моделях существенные смещения на разломе Сюргу-Чардак фиксируются до глубины в 20 км. В модели USGS величины смещений превосходят 11 м, в построенной нами

модели в верхней части самого западного элемента они равны 9.8 м, в модели [34] смещения здесь немного меньше.

В целом, полученные результаты согласуются с работой [34], за исключением наличия сейсмической брешы. Одной из причин расхождений в результатах может быть различие в методах решения. При расчете модели использовано регуляризирующее условие близости угла подвижки к заданному по решению механизма очага [26, 45]. 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.

Подчеркнем еще раз важное отличие построенной нами модели от моделей других авторов: на севере поверхность разрыва землетрясения 6.02.2023 г. перекрывается с областью разрыва землетрясения 2020 г., 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.).

Данная глава обосновывает четвертое защищаемое положение: «Построена новая модель поверхности разрыва землетрясения в Турции 6.02.2023 г. и постсейсмических процессов, полученные 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), методов многопроходных пар снимков (SBaS, IPTA), метода 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 определений смещений земной поверхности над ПХГ и калийными рудниками по снимкам с одной и двух орбит. Оценки получены с использованием 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 невысоким отношением сигнал/шум.
2. С применением этой технологии выполнен мониторинг оседаний над калийными рудниками в г. Березники и г. Соликамск, Пермского края. Также были применены методы устойчивых отражателей IPTA и SBaS. Анализ карт скоростей оседаний и временных рядов показал, что за период мониторинга оседания в основных областях продолжают с постоянной скоростью или замедляются, что говорит об эффективности принимаемых мер по защите подземных горных выработок. Отмечены две области, в начале проспекта Ленина и на юго-западном берегу Нижнезырянского водохранилища, где за период мониторинга скорости оседаний возросли примерно на 25 %.
3. Для территории г. Соликамска 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 при дальнейшем мониторинге.
4. Методами DInSAR и офсетов определены смещения земной поверхности и построена модель поверхности сейсмического разрыва катастрофического землетрясения в Турции 6.02.2023 г. В отличие от других моделей, построенная в работе 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 спутниковым радарным снимкам с одной и двух орбит. Результаты работы 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 – ошибки расчета не превосходят 10 мм, т.е. находятся на уровне точности методов РСА-интерферометрии. При использовании спутниковых данных с одной орбиты, ошибка определения величины субвертикальных смещений составляет около 10 %, а максимальная область оседаний сдвигается в сторону спутника (на запад для съемки с восходящей орбиты спутника и на восток – с нисходящей). Показано, что на картах смещений, построенных по снимкам с одной орбиты, ось мульды над лавой сдвигается в сторону спутника на 50-60 м. Эти смещения необходимо учитывать при работе со снимками с одной орбиты.

Список сокращений и условных обозначений

БКПРУ-1	– Березниковское калийное производственное рудоуправление № 1
ВАЗР	– Восточно-Анатолийская зона разломов
ГЛОНАСС	– Глобальная навигационная спутниковая система
ДЗЗ	– дистанционное зондирование Земли
ИКИ РАН	– Институт космических исследований Российской академии наук
ИФЗ РАН	– Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук
ПХГ	– подземные хранилища газа
СКРУ-2	– Соликамское калийное рудоуправление № 2
СО РАН	– Сибирское отделение Российской академии наук
РСА	– радиолокатор с синтезированной апертурой (англ. SAR – Synthetic Aperture Radar)
ЦМР	– цифровая модель рельефа (англ. DEM – Digital Elevation Model)
AFAD	– Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (Министерство по чрезвычайным ситуациям Турецкой республики)
GAMMA Software	– (программный комплекс обработки спутниковых данных)
GRACE	– Gravity Recovery And Climate Experiment (космическая миссия по изучению гравитационного поля Земли и его временных вариаций)
DEM	– Digital Elevation Model (цифровая модель рельефа)
DInSAR	– Differential Interferometry SAR (дифференциальная РСА-интерферометрия)
DLR	– German Aerospace Center (Немецкий центр авиации и космонавтики)
ESA	– European Space Agency (Европейское космическое агентство)
ESRI	– Environmental System Research Institute (Институт исследования систем окружающей среды)
GMTSAR	– Generic Mapping Tools (программный комплекс обработки спутниковых данных)
GPS	– Global Positioning System (система глобального позиционирования)
InSAR	– Interferometric Synthetic Aperture Radar (радиолокатор с синтезированной апертурой)
IPTA	– Interferometric Point Target Analysis (интерферометрический анализ точечных целей)

LOS	– Line-of-Sight (линия распространения радиолокационного сигнала / линия визирования)
MCF	– <i>Minimum cost flow</i>
PSInSAR	– Persistent Scatter Interferometric SAR (метод устойчивых отражателей)
SARscape	– (программный комплекс обработки спутниковых данных)
SBaS	– Small BAseLine Subset (метод малых базовых линий)
SNAP	– Sentinel Application Platform (программный комплекс обработки спутниковых данных Sentinel)
StaMPS-MTI	– Stanford Method for Persistent Scatterers/Multi-Temporal InSAR
Std	– Метод обработки спутниковых снимков («стандартный»)
Step	– Метод обработки спутниковых снимков («пошаговый»)
USGS	– United States Geological Survey (Геологическая служба США)
UTC	– Coordinated Universal Time (Всемирное координированное время)

Список литературы

1. Бабаянц, И.П. Мониторинг оседаний на территории г. Березники (Пермский край) методами спутниковой радарной интерферометрии. I. Дифференциальная интерферометрия / И.П. Бабаянц, А.А. Барях, М.С. Волкова, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, С.А. Хайретдинов // Геофизические исследования. – 2021. – Т. 22. – № 4. – С. 73–89. – doi.org/10.21455/gr2021.4-5.
2. Бабаянц, И.П. Мониторинг оседаний земной поверхности на территории г. Березники (Пермский край) методами спутниковой радарной интерферометрии: II. Метод устойчивых отражателей / И.П. Бабаянц, А.А. Барях, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, М.С. Волкова, С.А. Хайретдинов // Геофизические исследования. – 2023. – № 2. – С. 39–57. – doi.org/10.21455/gr2023.2-3.
3. Бабаянц, И.П. О точности расчёта вертикальной и восточной компонент смещения земной поверхности по снимкам спутниковых радаров с синтезированной апертурой с двух орбит / И.П. Бабаянц, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, С.А. Хайретдинов // 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. Бабаянц, И.П. Соотношение амплитуды и геометрии мульды сдвижения, определяемых по спутниковым радарным снимкам с одной или двух орбит / И.П. Бабаянц, В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, А.А. Барях // Геофизические исследования. – 2023. – Т. 24. – № 4. – С. 28–42. – <https://doi.org/10.21455/gr2023.4-2>.
5. Баранов, Ю. Б. Мониторинг смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов с помощью комплекса космических и геодезических методов / Ю. Б. Баранов, Ю. И. Кантемиров, Е. В. Киселевский, М. А. Болсуновский // Геоматика. – 2008. – № 1. – С. 51–55.
6. Барон, Л.И. Горное дело. Терминологический словарь / Л.И. Барон, Г.П. Демидюк и др. М.: Недра, 1981. – 479 с.
7. Барях, А.А. Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника / А.А. Барях, А.Е. Красноштейн, И.А. Санфиоров // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2013. – № 2. – С. 40–49.
8. Барях, А.А. Мониторинг последствий затопления калийного рудника / А.А. Барях, И.А. Санфиоров, Р.А. Дягилев // Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 34–39.
9. Барях, А.А. Геомеханическая оценка интенсивности деформационных процессов над затопленным калийным рудником / А.А. Барях, Н.А. Самоделкина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 4. – С. 33–46.

10. Барях, А.А. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования / А.А. Барях, Э.В. Смирнов, С.Ю. Квиткин, Л.О. Тенисон // Горная промышленность. – 2022. – № 1. – С. 41–50. – DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-41-5.
11. Барях, А.А. Математическое моделирование развития процесса сдвижения при отработке калийных руд длинными очистными забоями / А.А. Барях, С.Ю. Девятков, Э.Т. Денкевич // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 13–20.
12. Бачманов, Д.М. База данных активных разломов Евразии / Д.М. Бачманов, А.И. Кожурин, В.Г. Трифонов // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – Т. 8. – № 4. – С. 711–736.
13. Бондур, В.Г. Анализ динамики блоково-разломной структуры в районе землетрясений 2008 и 2020 г. на Южном Байкале методами спутниковой радиоинтерферометрии / В.Г. Бондур, Т.Н. Чимитдоржиев, Ц.А. Тубанов, А.В. Дмитриев, П.Н. Дагуров // Докл. АН Науки о Земле. – 2021. – Т. 499. – С. 144–150. – DOI: 10.31857/S268673972108003X.
14. Бондур, В.Г. Аномальная геодинамика перед землетрясением 2023 г. в Турции по данным спутниковой радарной интерферометрии 2028-2023 гг. / В.Г. Бондур, Т.Н. Чимитдоржиев, А.В. Дмитриев // Исследование Земли из космоса. – 2023. – № 3. – С. 3–12.
15. Буш, В. Контроль оседаний подработанных территорий методами радарной интерферометрии / В. Буш, Х.П. Хебель, М. Шаффер, Д. Вальтер, А.А. Барях // Маркшейдерия и недропользование. – 2009. – № 2. – С. 38–43.
16. Дмитриев, П.Н. Некоторые проблемы обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии на примере мониторинга оползневых процессов / П.Н. Дмитриев, В.И. Голубев, Ю.С. Исаев, Е.А. Киселева, В.О. Михайлов, Е.И. Смольянинова. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9. – № 2. – С. 130–144.
17. Киселёва, Е.А. Комплексование методов анализа амплитуды и фазы спутниковых радарных снимков для оценки смещений оползневых склонов / Е.А. Киселёва, В.О. Михайлов, Е.И. Смольянинова, Е.П. Тимошкина, П.Н. Дмитриев // ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. – 2015. – № 4. – С. 87–94.
18. Кологривко, А.А. Подземные горные работы / А.А. Кологривко. – Минск: БНТУ, 2006. – 94 с.
19. Кузьмин, Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании / Ю.О. Кузьмин // М.: Агентство Экономических Новостей, 1999. – 220 с.
20. Кузьмин, Ю.О. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород / Ю.О. Кузьмин, В.С. Жуков // М.: МГГУ, 2004. – 280 с.
21. Михайлов, В.О. Геодинамические модели и их применение при совместной интерпретации геологических и геофизических данных / В.О. Михайлов, В.М. Гордин, Е.П.

Тимошкина, Е.А. Киселева, Е.И. Смольянинова // Изв. РАН. Сер. Физика Земли. – 2007. – № 1. – С. 4-15.

22. Михайлов, В.О. Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09. 2003 г. / В.О. Михайлов, А.Н. Назарян, В.Б. Смирнов, М. Диаман, Н.М. Шапиро, Е.А. Киселева, С.А. Тихоцкий, С.А. Поляков, Е.И. Смольянинова, Е.П. Тимошкина // Физика Земли. – 2010. – № 2. С. 3–16.

23. Михайлов, В.О. Оценка полного вектора смещений земной поверхности и техногенных объектов по данным радарной спутниковой интерферометрии для областей разработки месторождений нефти и газа / В.О. Михайлов, Е.А. Киселева, П.Н. Дмитриев, В.И. Голубев, Е.И. Смольянинова, Е.П. Тимошкина // Геофизические исследования. – 2012. – № 3. С. 5–17.

24. Михайлов, В.О. Некоторые проблемы мониторинга оползневых процессов с использованием спутниковых радарных снимков с различной длиной волны на примере двух оползневых склонов в районе Большого Сочи / В.О. Михайлов, Е.А. Киселева, Е.И. Смольянинова, П.Н. Дмитриев, В.И. Голубев, Ю.С. Исаев, К.А. Дорохин, Е.П. Тимошкина, С.А. Хайретдинов // Изв. РАН, сер. «Физика Земли». – 2014. – № 4. – С. 1–11.

25. Михайлов В.О. Сравнительный анализ временных вариаций глобального гравитационного поля по данным спутников Грейс в областях трех недавних гигантских землетрясений // В.О. Михайлов, И. Пане, М. Хаен, Е.П. Тимошкина, С. Бонвало, В. Ляховский, М. Диаман, О. Девирон // Изв. РАН, «Физика Земли». – 2014. – № 2. – С. 29–40.

26. Михайлов, В.О. Проблемы совместной интерпретации временных вариаций гравитационного поля с данными о смещениях земной поверхности и дна океана на примере землетрясения Тохоку-Оки (11 марта 2011 г) / В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, Е.А. Киселева, С.А. Хайретдинов, П.Н. Дмитриев, И.М. Карташов, В.Б. Смирнов // Физика Земли. – 2019. – № 5. – С. 56–60. – DOI: 10.31857/S0002-33372019553-60.

27. Михайлов, В.О. Анализ смещений поверхности лавовых потоков Толбачинского трещинного извержения 2012–2013 г. методами спутниковой радарной интерферометрии / В.О. Михайлов, М.С. Волкова, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро, И.П. Бабаянц, П.Н. Дмитриев, С.А. Хайретдинов // Геофизические исследования. – 2020. – Т. 21. – № 4. – С.21–34. – doi.org/10.21455/gr2020.4-2.

28. Михайлов В.О. К вопросу о природе постсейсмических деформационных процессов в районе землетрясения Мауле, Чили, 27.02.2010 г. / В.О. Михайлов, Е.П. Тимошкина, В.Б. Смирнов, С.А. Хайретдинов, П.Н. Дмитриев // Физика Земли. – 2020. – № 6. – С. 38–47.

29. Михайлов, В.О. Землетрясения в Турции 06.02.2023: Модель поверхности разрыва по данным спутниковой радарной интерферометрии / В.О. Михайлов, И.П. Бабаянц, М.С. Волкова, Е.П. Тимошкина, В.Б. Смирнов, С.А. Тихоцкий // Доклады РАН, сер. Науки о Земле. – 2023. – Т. 511. – № 1. – С. 71–77.
30. Михайлов, В.О. Реконструкция косейсмических и постсейсмических процессов для землетрясения в Турции 06.02.2023 по данным радарной спутниковой интерферометрии / В.О. Михайлов, И.П. Бабаянц, М.С. Волкова, Е.П. Тимошкина, В.Б. Смирнов, С.А. Тихоцкий // Физика Земли. – 2023. – № 6. – С. 77–88.
31. Новокшенов, В.Н. Горизонтальное смещение земной поверхности в зависимости от максимального оседания в мульде сдвижения / В.Н. Новокшенов, А.Ф. Данилова, Н.М. Усова // Горная механика и машиностроение. – 2015. – № 1. – С. 5–8.
32. Указания по охране сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок в условиях Старобинского месторождения калийных солей // Солигорск – Минск, 2001. – 316 с.
33. Babayants, I.P. Monitoring of Subsidence in Berezniki City (Perm Krai) by SAR Interferometry. Method of Persistent Scatterers / I.P. Babayants, A.A. Baryakh, V.O. Mikhailov, E.P. Timoshkina, M.S. Volkova and S.A. Khairtdinov // Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2023, Vol. 59, No. 6, pp. 1066–1078. DOI: 10.1134/S1069351323060034.
34. Barbot, S. Slip distribution of the February 6, 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6, Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian Fault Zone/ S. Barbot., H. Luo, T. Wang, Y. Hamiel, O. Piatibratova, M.T. Javed., C. Braitenberg, G. Gurbuz // Seismica. – 2023. – Vol. 2(#3). – doi:10.26443/seismica.v2i3.502.
35. Basili, R. The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE / R. Basili, V. Kastelic, P. Petricca, G. Tarabusi, M. Tiberti, G. Valensise. –2013. – doi:10.6092/INGV.IT-SHARE-EDSF.
36. Baú, D. Surface flow boundary conditions in modeling land subsidence due to fluid withdrawal / D. Baú, M. Ferronato, G. Gambolati, &P. Teatini // Groundwater. –2004. – Vol. 42(4). – Pp. 516–525.
37. Bayrak, E. Earthquake hazard analysis for East Anatolian Fault Zone, Turkey / E. Bayrak, Ş. Yılmaz, M. Softa, T. Türker, & Y. Bayrak // Natural Hazards/ –2015. – Vol. 76(2). – Pp. 1063–1077. – doi:10.1007/s11069-014-1541-5.
38. Berardino, P. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms / P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti // IEEE Transact. Geoscience and Remote Sensing. – 2002. –Vol. 40. – No. 11. – Pp. 2375–2383.

39. Biot, M.A. General Solutions of the Equations of Elasticity and Consolidation for a Porous Medium / M.A. Biot // *Journ. Of Applied Mech.* – 1956. – Vol. 23. – Pp. 91–96.
40. Bürgmann, R. Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation / R. Bürgmann, P. Rosen, E. Fielding // *Ann. rev. earth. planet. sci.* – 2000. – Vol. 28. – Pp. 169–209.
41. Cai, J. An Adaptive Offset Tracking Method with SAR Images for Landslide Displacement Monitoring / J. Cai, C. Wang, X. Mao, Q Wang // *Remote Sens.* – 2017. – Vol. 9. – No. 8. – 830 p. – <https://doi.org/10.3390/rs9080830>.
42. Crosetto, M. Persistent Scatterer Interferometry: A review / M. Crosetto, O. Monserrat, M. Cuevas-Gonzalez, N. Devanthery, B. Chirpa // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* – 2016. – Vol. 115. – Pp.78–89.
43. Dai, K. Monitoring highway stability in permafrost regions with X-band temporary scatterers stacking InSAR / K. Dai, G. Liu, Z. Li, D. Ma, X. Wang, B. Zhang, J. Tang and G. Li // *Sensors.* – 2018. – Vol. 18. – <https://doi.org/10.3390/s18061876>.
44. Davies, J.H. Elastic field in a semi-infinite solid due to thermal expansion or a coherently misfitting inclusion / J.H. Davies // *J. Appl. Mech.* – Vol. 70. – No. 5. – 2003. – Pp. 655–660. – <https://doi.org/10.1115/1.1602481>.
45. Diament M. Joint inversion of GPS and high-resolution GRACE gravity data for the 2012 Wharton basin earthquakes / M. Diament, V. Mikhailov, E. Timoshkina // *Journal of Geodynamics.* – 2020. – Vol. 136. – doi.org/10.1016/j.jog.2020.101722.
46. Dinga, L.X. Atmospheric Effects On InSAR Measurements In Southern China And Australia: A Comparative Study / X.L. Dinga, L. Ge, Z.W. Li, C. Rizos // *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences.* – 2004. – Vol. 35, part 1. – Pp. 70–75.
47. Duman, T.Y. The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics / T.Y. Duman, & Ö Emre // *Geological Society, London, Special Publications.* – 2013. – Vol. 372(1). – Pp. 495–529. – [doi:10.1144/sp372.14](https://doi.org/10.1144/sp372.14).
48. Emardson, T.R. Neutral atmospheric delay in interferometric synthetic aperture radar applications: Statistical description and mitigation / T.R. Emardson, M. Simons, F.H. Webb // *Journal of geophysical research.* – 2003. – Vol. 108. – No. B5. – P. 2231–2238.
49. Ergin, M. Present Day Seismicity and Seismotectonics of the Cilician Basin: Eastern Mediterranean Region of Turkey / M. Ergin, M. Aktar, H. Eyidoğan // *Bulletin of the Seismological Society of America.* – 2004. – Vol. 94. – No. 3. – Pp. 930–939.

50. Ferretti, A. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry / A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2000. – Vol. 38(5). – Pp. 2202–2212.
51. Ferretti, A. Permanent scatterers in SAR interferometry / A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. – 2001. – Vol. 39. – No. 1. – Pp. 8–30.
52. Ferretti, A. InSAR permanent scatterer analysis reveals ups and downs in the San Francisco bay area / A. Ferretti, F. Novali, R. Burgmann, G. Hilley, C. Prati // *EOS*. – 2004. – Vol. 85. – No. 34. – Pp. 317–324.
53. Ferretti, A. Satellite InSAR Data: reservoir monitoring from space (EET 9) / A. Ferretti // *Earthdoc*. – 2014. – 178 p.
54. Foster, M.R. The coefficient of coherence; its estimation and use in geophysical data processing / M.R. Foster & N.J. Guinzy // *Geophysics*. – 1967. – Vol. 32(4). – Pp. 602–616.
55. Franceschetti, G. Synthetic aperture radar processing / G. Franceschetti, R. Lanari. – CRC press, 1999.
56. Geertsma, J. Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs / J. Geertsma // *Journal of Petroleum Technology*. – 1973. – Vol. 25. – No. 6. – Pp. 734–744.
57. Ghiglia, D.G. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods / D.G. Ghiglia, L.A. Romero // *Journal of the Optical Society of America A*. – 1994. – Vol. 11. – No. 1. – Pp. 107–117.
58. Goldstein, R.M. Satellite Radar Interferometry: Two-dimensional Phase Unwrapping / R.M. Goldstein, H.A. Zebker, C.L. Werner // *Radio Science*. – 1988. – Vol. 23. – No. 4. – Pp. 713–720.
59. Hanssen, R.F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, Kluwer / Hanssen, R.F. // Academic Publishers, Dordrecht, 2001. – 308 p.
60. Hellwich, O. SAR interferometry: Principles, processing, and perspectives / Olaf Hallwich // *Technische Universität München*. – 1999. – Pp. 109–120.
61. Hooper, A. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers / A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, B. Kampes // *Geophysical research letters*. – 2004. – Vol. 31. – L. 23611. – Pp. 1–5.
62. Hooper, A.J. Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation / A.J. Hooper // – 2006. – A dissertation, doctor of philosophy.
63. Jia, H. Improved offset tracking for predisaster deformation monitoring of the 2018 Jinsha River landslide (Tibet, China) / H. Jia, Y. Wang, D. Ge, Y. Deng, R. Wang // *Remote Sensing of Environment*. – 2020. – Vol. 247. – 111899. – <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111899>.

64. Kampes, B.M. Radar interferometry: persistent scatterer technique / B.M. Kampes. – Springer, 2006. – 220 p.
65. Lanari, R. An overview of the small baseline subset algorithm: a DInSAR technique for surface deformation analysis/ R. Lanari, F. Casu, M. Manzo, G. Zeni, P. Berardino, M. Manunta, A. Pepe // *Pure appl. geophys.* – 2007. – Vol. 164. – Pp. 637–661.
66. Lin, Q. New approaches in interferometric SAR data processing / Q. Lin, J.F. Vesecky, H.A. Zebker // *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing.* – 1992. – Vol. 30. – Pp. 560–567.
67. MacMillan, W.D. The theory of the Potential / W.D. MacMillan // *Dover Publications*, New York, 1930.
68. Massonnet, D. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface / D. Massonnet, K. L. Feigl // *Rev. geophys.* – 1998. – Vol. 36. – No. 4. – Pp. 441–500.
69. Massonnet D. Imaging with synthetic aperture radar / D. Massonnet, J-C. Souyris // *EPFL Press.* – 2008. – 280 p.
70. McClusky, S. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus / S. McClusky, S. Balassanian, A. Barka, C. Demir, S. Ergintav, I. Georgiev, O. Gurkan, M. Hamburger, K. Hurst, H. Kahle, and K. Kastens // *J. Geophys. Res.* – 2000. – Vol. 105. No. B3. Pp. 5695–5719.
71. Milkereit, C. Implications of the 2003 Bingöl Earthquake for the Interaction between the North and East Anatolian Faults / C. Milkereit, H. Grosser, R. Wang, H. Wetzell, H. Woith, S. Karakisa, S. Zünbül, & J. Zschau // *Bulletin of the Seismological Society of America.* – 2004. – Vol. 94. – Pp. 2400–2406.
72. Nozaki, H. Elastic fields in a polygon-shaped inclusion with uniform eigenstrain / H. Nozaki, M. Taya // *J. Appl. Mech.* – Vol. 64. – No. 3. – 1997. – Pp. 495–502. – <https://doi.org/10.1115/1.2788920>.
73. Okada, Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space / Y. Okada // *BSSA.* – 1985. – Vol. 75 (4). – Pp. 1135–1154.
74. Özmen, Ö.T. Microtremor Array Measurements for Shallow S-Wave Profiles at Strong-Motion Stations in Hatay and Kahramanmaraş Provinces, Southern Turkey / Ö.T. Özmen, H. Yamanaka, M.A. Alkan, U. Çeken, T. Öztürk and A. Sezen // *Bulletin of the Seismological Society of America.* – 2017. – Vol. 107. – No. 1. – Pp. 445–455.
75. Papoulis, A. Random variables and stochastic processes / A. Papoulis // *McGraw Hill.* – 1991.
76. Peltzer, G. 2001. Transient strain accumulation and fault interaction in the Eastern California shear zone / G. Peltzer, F. Crampé, S. Hensley, P. Rosen // *Geology.* – 2001. – Vol. 29. – Pp. 975–978. – [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0975:TSAAFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0975:TSAAFI>2.0.CO;2).

77. Pollitz, F.F. Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth / F.F. Pollitz // *Geophysical Journal International*. – 1996. – Vol. 125 (1). – Pp. 1–14.
78. Prati, C. A 2-D phase unwrapping technique based on phase and absolute value information / C. Prati, M. Giani, and N. Leuratti // *Conference IGARSS'90*. – 1990. – Pp. 2043–2046.
79. Rauche, H. Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert: Stand der Technik bei der Rohstoffgewinnung und der Rohstoffaufbereitung sowie bei der Entsorgung der dabei anfallenden Rückstände / H. Rauche // Springer-Verlag, 2015.
80. Reilinger, R.S. GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions / R.S. Reilinger, P. McClusky, S. Vernant, S. Lawrence, R. Ergintav, H. Cakmak, F. Ozener, I. Kadirov, R. Guliev, R. Stepanyan, M. Nadariya et al. // *Journal of Geophysical Research* – 2006. – Vol. 111. – No. B05411. – Pp. 1–26. – <https://doi.org/10.1029/2005JB004051>.
81. Rodin, G.J. Eshelby's inclusion problem for polygons and polyhedral / G.J. Rodin // *J. Mech. Phys. Solids*. – Vol. 44. – 1996. – Pp. 1977–1995. – [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(96\)00066-X](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(96)00066-X).
82. Samsonov, S. V. Application of DInSAR-GPS optimization for derivation of three-dimensional surface motion of the southern California region along the San Andreas fault / S.V. Samsonov, K.F. Tiampo, J.B. Rundle // *Computers & Geosciences*. – 2008. – Vol. 34. – No. 5. – Pp. 503–514.
83. Snieder, R. Advanced noninvasive geophysical monitoring techniques / R. Snieder, S. Hubbard, M. Haney, G. Bawden, P. Hatchell, A. Revil // *Annu. Rev. Earth Pl. Sc.* – 2007. – No. 35. – Pp. 653–683.
84. Strozzi, T. Glacier motion estimated using SAR offset-tracking procedures / T. Strozzi, A. Luckman, T. Murray, U. Wergmuller, C.L. Werner // *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2002. – Vol. 40. – No. 11. – Pp. 2384–2391.
85. Teatini, P. Monitoring and modeling 3-D ground movements induced by seasonal gas storage in deep reservoirs / P. Teatini, G. Gambolati, N. Castelletto, M. Ferronato, C. Janna, E. Cairo, D. Marzorati, D. Colombo, A. Ferretti, A. Bagliani, F. Bottazzi, F. Rocca // *Proceedings of EISOLS 2010*. – 2010.
86. Valero, J.L. A survey of phase unwrapping techniques, with applications to SAR / J.L. Valero, I. Cumming // *Technical report*. – 1995.
87. Waldvogel, J. The Newtonian potential of homogeneous polyhedral / J. Waldvogel // *ZAMP*. – Vol. 30. – 1979. – Pp. 388–398.

88. Wegmüller, U. Multi-temporal interferometric point target analysis. Analysis of Multi-temporal remote sensing images, Smits and Bruzzone (ed.), / U. Wegmüller, C. Werner, T. Strozzi, and A. Wiesmann // *Series in Remote Sensing*. – 2004. – Vol. 3. – Pp. 136–144.
89. Werner, C. Precision estimation of local offsets between pairs of SAR SLCs and detected SAR images / C. Werner, U. Wegmüller, T. Strozzi, A. Wiesmann // In: *Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05*.
90. Westaway, R.O. The Gölbaşı basin, southeastern Turkey: a complex discontinuity in a major strike-slip fault zone / R.O. Westaway, & J.A.N. Arger // *Journal of the Geological Society*. – 1996. – Vol. 153(5). – Pp. 729–744.
91. Wright, T. Measurement of interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault by satellite radar interferometry / T. Wright, B. Parsons, E. Fielding // *Geophys. Res. Lett.* – 2001. Vol. 28. – Pp. 2117–2120. <https://doi.org/10.1029/2000GL012850>.
92. Wright, T.J. InSAR observations of low slip rates on the major faults of Western Tibet / T.J. Wright, B. Parsons, P.C. England, E.J. Fielding // *Science*. – 2004. – Vol. 305. – Pp. 236–239. <https://doi.org/10.1126/science.1096388>.
93. Xu, J. Source Process of the 24 January 2020 Mw 6.7 East Anatolian Fault Zone, Turkey, Earthquake / J. Xu, C. Liu, and X. Xiong // *Seismol. Res. Lett.* – 2020. – Vol. 91. – Pp. 3120–3128. – doi:10.1785/0220200124.
94. Zebker, H.A. Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations / H.A. Zebker, R.M. Goldstein // *Journal of geophysical research*. – 1986. – Vol. 91. – No. B5. – Pp. 4993–4999.
95. Zebker, H.A. Decorrelation in interferometric radar echoes / H.A. Zebker, J. Villasenor // *IEEE trans. geosci. remote sensing*. – 1992. – Vol. 30. – Pp. 950–959.
96. Zhang, L. Identifying potential landslides by stacking-InSAR in Southwestern China and its performance comparison with SBAS-InSAR / L. Zhang, K. Dai, J. Deng, D. Ge, R. Liang, W. Li, Q. Xu // *Remote Sens.* – 2021. – Vol. 13. – 3662 p. <https://doi.org/10.3390/rs13183662>.
97. Zhang, C. Landslide Detection of the Jinsha River Region Using GACOS Assisted InSAR Stacking / C. Zhang, Z. Li, C. Yu, C. Song, R. Xiao, J. Peng // *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. – 2021. – Vol. 46. – Pp. 1649–1657. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200675>.