

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Бабаянца Игоря Павловича «ПОЛЯ СМЕЩЕНИЙ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ: МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ» по специальности 1.6.9. - Геофизика на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Актуальность исследований.

Актуальность и важность исследования естественных (в частности, связанных с природными катастрофами) и техногенных деформаций земной поверхности вполне очевидна. Как очевидна и ограниченная возможность наземных геодезических методов. В последние десятилетия широко применяется мониторинг деформаций космическими средствами базирования. Среди таких методов все более широкое применение получает спутниковая радарная интерферометрия. 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 составляет 6-12 дней. Получаемые по РСА снимкам интерферограммы позволяют, в принципе, проводить оперативный мониторинг смещений земной поверхности и на этой основе строить модели природных и природно-техногенных процессов. В отличие от методов с использованием искусственных приемников и отражателей, метод РСА-интерферометрии позволяет охватывать мониторингом большие территории, причем с высоким разрешением. Но при этом, ввиду резкого ухудшения стабильности условий отражения, возникает задача борьбы с шумами и повышения робастности получаемой информации. В настоящее время методом РСА-интерферометрии представляется возможным изучать смещения земной поверхности, величиной в первые сантиметры за период между радарными снимками (обычно 11-12 дней), причем преимущественно в условиях отсутствия снежного покрова, листвы и иных сильных помех. Но и при таких ограничениях применение метода РСА-интерферометрии весьма широко – это и области сильных землетрясений, и районы сильного антропогенного воздействия.

Однако, даже и в случае больших смещений земной поверхности, применение метода РСА-интерферометрии часто затруднено; при часто имеющей места низкой коррелированности повторных снимков стандартная обработка оказывается не эффективной и требуется подбор оптимальных методов обработки данных, их комплексирование, и совершенствование методов обработки с учетом конкретных условий съемки и задач исследования.

В диссертации рассматриваются как методические вопросы, так и проводится анализ ряда важных случаев сильного антропогенного воздействия и деформации в очагах сильных землетрясений. Подробно исследуются области сильных антропогенных деформаций земной поверхности, связанных с добычей калийных солей в районе городов Березники и Соликамск; для районов добычи калийных солей и для подземных хранилищ газа (ПХГ) сделаны модельные расчеты типового варианта. Полученные результаты представляют несомненный методический и практический интерес. Применительно к сильным природным деформациям рассмотрен случай дуплета катастрофических турецких землетрясений 6 февраля 2023 года. В данном случае получены также и важные новые научные результаты.

Представленная работа несомненно лежит в русле мировой тенденции развития науки и при этом соответствует двум приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Рациональное природопользование» и «Транспортные и космические системы», а из перечня критических технологий Российской Федерации соответствует разделам «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения» и «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и

техногенного характера». Оппоненту было тем более интересно ознакомиться с диссертацией, что ранее, по материалам наземной геодезии он сталкивался с аномально большими, но отрывочными и потому трудно тогда интерпретируемыми данными по техногенным просадкам земной поверхности и с анализом ко- и постсейсмических деформаций по данным ГНСС мониторинга. Работа соискателя, несомненно, является шагом вперед в такого рода исследованиях, имеющих несомненное как практическое, так и теоретическое научное значение.

Из вышесказанного вполне очевидна актуальность диссертации соискателя.

Цель и задачи исследований.

Цели и задачи исследования можно кратко охарактеризовать как разработку и реализацию методики использования данных РСА-интерферометрии в реальных условиях невысокой когерентности последующих снимков (в частности, порождаемой сильной залесенностью территории и наличием длительного мощного снежного покрова, что характерно для территории Российской Федерации). Соискателем решались как практические задачи, так и методические, и научные. Более подробно цели, задачи, суть проведенных исследований, адекватность представления результатов, а также некоторые замечания к работе и к форме представления результатов даны ниже.

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

В первой главе «Основные проблемы оценки полей смещений по данным спутниковой радарной интерферометрии и их интерпретации» автором рассмотрены известные принципы и методы радиолокационной съемки радарными с синтезированной апертурой (РСА). Дан критический обзор основных методов обработки спутниковых снимков – дифференциальной интерферометрии (DInSAR), метода малых базовых линий (SBaS), точечных объектов (IPTA) и офсетов. Сформулированы и обоснованы цели и методы исследования. Далее приводятся характеристики спутников Sentinel-1A, Sentinel-1B, TerraSAR-X и получаемых на них снимков земной поверхности. Введены основные понятия спутниковой РСА-интерферометрии, методы введения поправок за атмосферные эффекты, учета высокочастотных и трендовых помех, подходы к развертке фазы для получения величин смещений. На выходе (когда это возможно) получают карты смещений отражающей поверхности. Эта информация используется соискателем для разработки комбинированных технологий обработки данных РСА-мониторинга - методов Std и Step, как показано далее соискателем, достаточно эффективных при наличии обширных некогерентных зон и при невысоком отношении сигнал/шум.

В разделе 1.2 рассмотрен метод устойчивых точечных отражателей (PSInSAR), использующий совокупности (не менее 12-15) снимков исследуемой территории. Этот метод (точечный, но более точный) позволяет получать уточнения цифровой модели рельефа (ЦМР) и атмосферной поправки. На выходе можно получить и временные ряды смещений для отдельных точек.

Последний раздел первой главы (1:3) посвящен обсуждению методов развертки отраженного фазового сигнала (исходно свернутого по модулю 2π). Это задача неоднозначна и выполняется в предположении, что поле смещений является гладким и смещения в соседних пикселях отличаются не более чем на половину длины волны. В случае больших смещений (часто наиболее интересный случай), операция может быть выполнена с ошибками или не выполнима вовсе. Эту проблему решает метод офсетов, который использует кросс-корреляционные функции амплитуды сигнала и не требует развертки фазы. Положение максимума двумерной функции кросс-корреляции определяет смещение в координатах снимка. Метод офсетов применим для областей с большими амплитудами смещений.

На основании изложенного в разделах 1.1 – 1.3 делается вывод об актуальности разработки технологии обработки РСА снимков, дающей наилучший результат в конкретных условиях, для решения конкретной задачи.

Замечания к первой главе имеют чисто редакционный характер. В табл. 1.1 (стр. 14) дано указание на режим съемки StripMap, но параметры съемки не поясняются; описание другого режима съемки (W) дано существенно после, на стр.29.

Вторая глава «Технология оценки оседаний на подработанных территориях в г. Березники и г. Соликамск» посвящена обсуждению в значительной степени авторских методик анализа РСА данных для областей разработки месторождений калийных и магниевых солей (районы городов Березники и Соликамск). Выбор районов исследования связан с развитием в этих областей интенсивных техногенных оседаний земной поверхности. РСА-мониторинг осложнен характером рельефа, высокой степенью залесенности территории, наличием заросших растительностью опасных территорий, длительным наличием мощного снежного покрова. В связи с этими факторами когерентность отражений на больших участках территории оказывается недостаточной для успешного применения общераспространённых методов обработки снимков. Это потребовало разработки специальных технологий их обработки.

Раздел 2.2 посвящен описанию и обоснованию технологии, применяемой далее для обработки пар снимков и расчета смещений. Расчет (для спутника TerraSAR-X) проводился по последовательным пролетам через 11 и 22 дня. Аналогично вычислялись смещения за 33 дня, а в случае временной декорреляции снимков, суммированием смещений, полученных за интервалы времени 11 и 22 дня. Большая часть исследуемой территории не испытывает сильного техногенного стресса, соответственно смещения за 11 дней малы, а разности фаз для снимков, выполненных через 22 и 33 дня, имеет более высокое соотношение сигнал/шум.

Карты когерентности свидетельствуют, что городская территория чаще имеет достаточно хорошую когерентность, но встречаемые в городской черте территории провалов (наиболее важные с практической точки зрения) и залесённые территории – слабо когерентны. Зимой из-за снега, и летом, из-за листвы, когерентность ухудшается. При лучших условиях съемки за интервалы 11 и 22 дня фазовый «деформационный» сигнал часто сопоставим с уровнем атмосферных помех и шумов аппаратуры, а при расчете за более длительный период теряется когерентность между снимками. Эти трудности потребовали создания специальной технологии мониторинга, на основе сочетания разных методов обработки. Используемый соискателем подход базируется на совместном применении двух методов, названных Std (модификация метода DInSAR) и Step (пошаговый метод развертки фазы для создания референсной модели).

Метод Std предназначен для определения смещений на хорошо отражающих площадках и не предназначен для развертки фазы и оценки смещений в низкокогерентных областях. При расчете смещений используется базовая ЦМР модель Copernicus DEM с пространственным разрешением 30 м. Так как размер пикселя для спутника TerraSAR-X составляет примерно 3×3 м, а для спутника Sentinel-1– 5×20 м, то данные ЦМР интерполировались (что неизбежно предполагает ошибки ЦМР). Вычисляется фазовая интерферограмма и из нее вычитается разница по модели ЦМР, в результате получалась дифференциальная интерферограмма. Процедура развертки фазы дифференциальной интерферограммы учитывает когерентность между снимками. Если величина когерентность менее 0.2, то развертка не производится; а значения более 0.2 полагаются весовой функцией развертки. Метод позволяет уменьшить вклад высокочастотного шума. Получаемая фаза пересчитывается в смещения в направлении на спутник (LOS) или, если можно положить горизонтальные смещения малыми, в субвертикальные смещения.

Метод Step предусматривает большее сглаживание, но дает решение также и на области с более низкими значениями когерентности. Методы Std и Step дополняют друг друга, позволяя получить как площадную оценку смещений, так и более точные по точечные оценки смещений. В диссертации показано, что в областях с хорошей когерентностью эти методы дают близкие результаты. Эффективность предложенной методики продемонстрирована в третьей главе для данных мониторинга на территории г. Березники и г. Соликамска, и их окрестности по данным за 2020-2022 годы.

По материалам главы сформулировано первое защищаемое положение «Для территорий с обширными некогерентными областями разработана технология оценки полей смещений земной поверхности по спутниковым радарным снимкам методом дифференциальной интерферометрии, включающая два метода, которые дополняют друг друга и позволяют одновременно оценивать смещения в высоко когерентных и низко когерентных областях». Защищаемое положение возражений не вызывает.

Замечания ко второй главе:

Соискатель пишет, что порог когерентности снимков выбирается в пределах 0.2-0.3. Но можно думать, что порог зависит и от детальности и размеров снимка (числа пикселей), и, по сути, характеризует степень близости множеств, зависящую как от степени когерентности снимков, так и от их размера. Возможно, следовало бы охарактеризовать выбранный критерий в терминах вероятности случайного возникновения пороговой корреляции.

Не вполне удачен выбор терминов - расстояния «по дальности» и «по азимуту»; расстояние по азимуту звучит особенно двусмысленно. Может стоило бы использовать более прозрачные названия – скажем, расстояния (смещения) вдоль орбиты и по нормали к орбите спутника.

Не вполне понятно пристрастие соискателя к сленгу. Соискатель употребляет, например, «стек», по чему не более понятное читателю – «набор»? Почему «оседания», а не, скажем, «прогибания», почему мультилукинг, а не какой-то более понятный аналог?

Третья глава «Результаты мониторинга движений на подрабатываемых территориях гг. Березники и Соликамск на основе разработанных технологий и метода анализа временных рядов оседаний» является одной из ключевых. В главе описаны результаты мониторинга территории г. Березники и г. Соликамска, и их окрестностей на основе данных за 2020-2022 годы по методикам анализа, описанным во второй главе.

В разделе 3.1 обосновывается выбор стратегии мониторинга указанных территорий. Методом расчета парных интерферограмм и их суммирования за более длительные интервалы времени получены карты смещений земной поверхности за бесснежные периоды времени. Показано, что при хорошей когерентности методы Std и Step дают близкие результаты.

В разделе 3.2 обсуждаются результаты площадных оценок скоростей смещений (проседаний) земной поверхности в районе города Березники. Выявлены районы интенсивных (потенциально опасных) проседаний поверхности земли. В большинстве таких областей скорость проседаний в 2020 – 2022 годах оставалась примерно постоянна или замедлялась. Ускорение наблюдается только в одном районе (вблизи проспекта Ленина).

Замечания по разделу:

На большинстве рисунков использована неудачная цветовая шкала, максимальные значения деформаций часто даны серыми невыразительными тонами. При этом часто на однотипных рисунках шкалы разные. Так рис.3.2 демонстрирует согласованность методов Std и Step в условиях высокой (А и Б) и низкой (В и Г) когерентности, но при этом по сути идентичные шкалы на В и Г выполнены в разной цветовой гамме. Практически на всех рисунках не дана удобная для понимания локализация изображенной области. В подписях

к рисункам встречается неаккуратность со знаками. Так, например, на рис.3.5 данные по РСА-интерферометрии даны в м/год и везде с отрицательными знаками, а по геодезическим измерениям значения указаны в мм/год и от -27 до 398.1.

Те или иные замечания есть к большинству рисунков главы 3.

К интерпретации данных также есть вопросы:

На рис.3.5 и 3.6 (имеется в виду второй рисунок с номером 3.6) определенные методами РСА-интерферометрии изолинии вертикальных смещений почти идеально ложатся вдоль берегов водоемов. Не является ли это артефактом изменений уровня воды?

На рис. 3.12 в субмеридионально ориентированной мульде проседаний видны 3 максимума проседаний. Их возникновение не вполне понятно, если есть какие-то предположения, следовало бы их привести (кстати, а автореферате эта мульда ошибочно характеризуется как «вытянутая в широтном направлении»).

В разделе 3.3 для района г. Березники приводятся результаты оценки средних скоростей смещений на основе метода устойчивых отражателей, что позволяет получать смещения в отдельных, в том числе изолированных, областях.

Автором приводятся результаты сравнения данных РСА-интерферометрии и обычных наземных геодезических наблюдений. Показано, что для 90% точек, разность скоростей смещений, полученных этими методами, не превышает 2 см/год. При этом, стандартное отклонение разности смещений составило 20 мм/год. Такое значение было бы весьма большим и неприемлемым при анализе обычных данных по СВДЗК, но его можно считать вполне удовлетворительным для областей сильного антропогенного пресса с большими величинами смещений (каковы данные исследуемые районы).

В разделе 3.4 приведены результаты площадного мониторинга смещений земной поверхности в районе г. Соликамск и его окрестностей. Величины оседаний здесь, в среднем, менее устойчивы, и потому использовано суммирование за более длительный интервал времени.

Смещения более 100 мм/год фиксируются только на поверхности солеотвала. Согласие наземных геодезических и результатов РСА-интерферометрии здесь менее четкое; нивелировки есть по системам реперов, расположенных вне зоны наземных работ, а РСА-интерферометрия фиксирует умеренные смещения во всех областях.

Замечания к разделу:

Цветовая шкала на рис.3.17 весьма неудачна, значки, отвечающие сравнению с геодезическими данными плохо видны. Читателю трудно составить свое мнение о степени согласованности обычных геодезических данных и результатов РСА-интерферометрии.

На стр. 64, для района Соликамска, для 2021 года, написано «Метод Std позволил получить значения оседаний для более чем 82 тыс. элементов разрешения (пикселей). Из них в пределах от -20 до 20 мм/год находится более 52 тыс. значений.» А на стр. 68, для данных за 2022 год, читаем: «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.». Результаты статистически существенно разные, возникает вопрос – почему?

На стр. 67 соискатель пишет, что «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». Читателю остается не ясным, какая бы это могла быть деятельность. 20 см/год – это экстремально много, может это связано с растворением материала солеотвала? Возможные объяснения стоило бы отметить.

Утверждение соискателя, что «отсутствие принципиальных расхождений вне зоны наземных работ указывает на то, что наземная геодезия и РСА-интерферометрия и здесь

дополняют друг друга» не кажется вполне убедительным, так как величины смещений и рассогласования вне зоны сильных антропогенных воздействий сравнимы с ошибками РСА-интерферометрии (20 мм/год), что для обычных скоростей СВДЗК уже аномально много.

В разделе 3.5 дан анализ временных рядов проседаний земной поверхности в районе г. Березники. Такой анализ весьма важен для оценки эффективности мер по защите горных выработок и наземной инфраструктуры и для планирования защитных мероприятий. Особенно важно, в плане выделения особенно опасных участков и проведения превентивных мероприятий, выявление участков, где оседания ускоряются. Наблюденные временные ряды смещений аппроксимировались автором линейными и квадратичными функциями; особый интерес вызывают ситуации, где наблюдается значимый рост скоростей оседания во времени.

Замечания по разделу:

Автор (стр. 74) делает важный в практическом отношении вывод, что «почти все обнаруженные устойчивые отражатели, демонстрирующие ускорение, находятся на крышах строений. По всей вероятности, замедление погружения на 3–5 см в весенний период связано с повышением температуры и термическим расширением строений. Этот эффект не фиксируется геодезическими реперами, расположенными на грунте или в основании зданий.» Такое предположение следовало бы подкрепить оценками возможной величины теплового эффекта.

Материалами 3-ей главы показано, что анализ смещений путем сравнения парных интерферограмм и на основе устойчивых отражателей дополняют друг друга. Сравнение и суммирование снимков обычно не дает анализа смещений во времени, но позволяет получать карты средних смещений. Метод устойчивых отражателей дает временные ряды для отдельных локализаций. В областях, где результаты получены обоими методами, они разумно согласуются.

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

Замечания по главе:

Формулировка второго защищаемого положения не вполне хороша в редакционном плане. Она звучит как отчет о рутинном мероприятии, без существенного элемента нового. Такая формулировка хорошо бы подошла для отчета по хоздоговорной теме, но не как вывод для диссертации, соискатель явно преуменьшает собственные достижения.

В выводах по главе 3 соискатель пишет «Большая часть оседаний происходит более-менее равномерно; на значительной части территории скорость оседания уменьшилась. Это свидетельствует о действенности принимаемых мер по защите наземной инфраструктуры». Но данных по динамике добычи, по величине антропогенного стресса не приводится. Может играет этот фактор, а не принимаемые меры?

Глава 4 называется «Оценки точности определения смещений земной поверхности над ПХГ и калийными рудниками по спутниковым снимкам с одной и двух орбит с применением геомеханических моделей.» и носит более методический характер.

В главе использованы численные модели смещений земной поверхности при отборе газа и добыче руды. На их основе рассчитаны компоненты смещений поверхности земли по вертикали и по горизонтали, и смещения на спутник, которые могут быть получены при съемке с восходящей и нисходящей орбит спутника. Показано, что данные о смещениях на спутник могут быть использованы для расчета субвертикальных смещений по данным с одной орбиты, а для смещений по вертикали и на восток - по данным с двух орбит. При таких расчетах использовано, что орбита спутника субполярная, и смещения вдоль орбиты (примерно NS) входят в уравнение с меньшими коэффициентами, и по сравнению двумя другими компонентами ими часто можно пренебречь. Тем самым получают требуемое решение. Показано, что погрешности такого расчета отвечают практическим требованиям. Далее анализируются расхождения между модельными смещениями, получаемыми по данным с одной и с двух орбит, с величинами, получаемыми по классическим моделям теории упругости.

В разделе 4.1 рассмотрена модель близкая к реальному подземному хранилищу газа (ПХГ), для которой ранее были проведены расчеты смещений по снимкам спутника Sentinel-1A. Использована классическая модель смещений поверхности упругого полупространства при изменении давления в некоем подземном центре дилатации (в малом сферическом объеме). Решение проинтегрировано для случая ПХГ, расположенного в слое конечной толщины. Задание характерных параметров позволяет по этой модели рассчитать теоретические компоненты смещения по трём направлениям и сравнить со смещениями на спутник для случаев восходящей и нисходящей орбит, используя реальные параметры спутника Sentinel-1A.

Выявлено, что модель, кроме доминирующих зон проседаний дает и существенно меньшие области поднятий, а также систематическое смещение областей максимума оседаний. Смещение происходит в сторону спутника, что позволяет, при использовании данных и с восходящей, и с нисходящей орбиты, убрать это смещение. Вертикальные смещения при этом незначительно отличаются от истинных (модельных) значений.

Методически аналогично в разделе 4.2 рассматривается случай мульды оседания над калийными рудниками (подземными лавами). В разделе 4.1 было показано различие конфигурации вертикальных смещений поверхности и по данным наклонного наблюдения (съемки местности) со спутника. В качестве расчетной модели использована инженерная (классическая) модель оседаний земной поверхности над одиночной горной выработкой (лавой). Модель задает соотношения между параметрами лавы и геометрией зоны деформаций на земной поверхности. Эта модель использована соискателем для сравнения с результатами анализа смещений, получаемых при наблюдениях с одной или с двух орбит. Для модельной лавы были приняты параметры, близкие к таковым для Старобинского месторождения калийных солей.

Автором показано, что смещения положений осей мульды на картах смещений, рассчитанных по снимкам с одной орбиты, зависят от простирания, и что область максимального оседания смещается на запад по данным с восходящей орбиты, и на восток - с нисходящей. Но при использовании данных с обеих (нисходящей и восходящей) орбиты, ось мульды не смещается. При этом максимальная величина оседаний определяется достаточно точно. Погрешность в определение положения мульды больше там, где велика пренебрегаемая долготная (северная) компонента смещений.

Вывод сформулирован автором в третьем защищаемом положении «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». К выводу замечаний нет, разве может следовало бы начать: «Получены оценки ...».

Замечания к главе:

Соискатель почти не поясняет параметры принятого модельного ПХГ, читателю непонятна форма внешней изолинии на рис.4.1. Также нет достаточно детального пояснения возникновения при расчетах положительных смещений. Следовало бы дать, видимо, поясняющий рисунок.

Соискатель пишет: «Максимум в поле смещений на спутник всегда сдвигается относительно точки максимального значения вертикальной компоненты в сторону спутника». «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).» Но рис.4.2 по мнению рецензента, мало что поясняет, просто дает ответ, при этом с неудачной шкалой: яркий красный цвет отвечает смещениям величиной около +10, а блеклый синеватый – менее -80.

На стр.85 соискатель пишет: «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.» Такого пояснения, ссылки на ранее проведенные исследования, для диссертации не достаточно.

Результаты главы 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.» По сути возражений нет, но возможно лучше бы была формулировка типа «Получена и обоснована оценка ...».

С сейсмологической точки зрения особый интерес представляет материал 5-й главы диссертации: **«Применение дифференциальной интерферометрии и метода офсетов для исследования косейсмических и постсейсмических процессов в области землетрясения в Турции 6.02.2023 г.»**

В разделе 5.1 кратко описано сеймотектоническое строение района катастрофических турецких землетрясений Mw 7.8 и 7.5 и их многочисленных афтершоков.

В разделе 5.2 описывается методика и результаты анализа интерферограмм. Смещения оценивались по парам спутниковых снимков Sentinel-1A, выполненных до и после дуплета турецких землетрясений с восходящей и нисходящей орбиты спутника. В диссертации подробно описывается лучший результат, полученный по данным снимков с нисходящей орбиты от 29 января и 10 февраля 2023 года. По парам интерферограмм методом DInSAR определены смещения в направлении на спутник (U_{Los}). Методом офсетов рассчитаны достаточно большие (до 5 и более м) смещения вдоль и поперек орбиты, а по ним параметры вектора горизонтальных смещений (в предположении малости вертикальной компоненты).

Карты смещений (рис. 5.3 – 5.5) смотрятся просто превосходно!

Замечания по разделу:

Надо ли понимать (см, рис. 5.4), что для 2-го сильного землетрясения существенно более активно северное крыло разлома? Меньшая асимметрия наблюдается и для очаговой области 1-го землетрясения.

Интересный результат, что области косейсмической деформации 1-го и 2-го землетрясений дуплета не перекрываются. Заметим, что это же следует по данным о расположении их афтершоковых последовательностей (материалы оппонента).

Соискатель приводит (рис.5.6) смещения за интервал времени от 10.02.2023 г. и 22.02.2023 и характеризует их как постсейсмические. Но насколько данные за 12 дней представительны как «постсейсмические»?

Представляется весьма интересным (рис. 5.6), что постсейсмические смещения за 10.02.2023 г. до 22.02.2023 г не привязаны к разломам; смещения не меняют знак на разломе (рис. 5.6). Но обычно постсейсмичные деформации как бы «наследуют»

косейсмические (или противоположны им), они весьма продолжительные и по суммарной величине часто близки к косейсмичным. Возможно, использованный интервал времени не обеспечивает получение представительных данных, но и эти данные весьма интересны.

Стр. 107. Что значит «Возможно, что на постсейсмическом этапе разлом немного продвинулся на восток.»? Не ясно.

В разделе 5.3 приведены результаты определения параметров сейсмического разрыва. Линия разграничения смещений противоположного направления хорошо совпадает с положением разломов. Зона разлома Сюргу-Чардак разделена соискателем по простиранию на 4 элемента, а разлома на ВАР – на 15 элементов. По глубине эти разломы разделены на три этажа. Небольшой разрыв, с которого начались землетрясения, задан одним прямоугольным элементом с глубиной верхней кромки 0.5 км, нижней – 15 км с углом падения 85° на восток. Длина этого разрыва по простиранию положена равной 15 км. Смещения определены в предположении, что они близки к чистому сдвигу. Для решения использовано известное решение задачи о смещениях на поверхности сферической, радиально расслоенной планеты в результате сдвига заданного направления на заданной площадке в упругой среде на данной глубине.

Отличие полученной модели от модели USGS состоит в большей детальности поверхностей разрыва. При этом, в полученной автором модели на севере поверхность разрыва вдоль ВАР перекрывается с областью разрыва землетрясения 24.01.2020 г., что указывает на отсутствие пробела между очаговыми областями этих землетрясений. Соответственно, в полученной соискателем модели отсутствует потенциально сейсмоопасный промежуток, предполагаемый в (Barbot et al., 2023). В качестве одной из причин расхождений с моделью (Barbot et al., 2023) соискатель указывает, что в расчете им использовано условие близости угла подвижки к заданному по решению механизма очага (Михайлов и др., 2019; Diament et al., 2020). В качестве другой возможной причины соискатель называет использование сферической, радиально симметричной модели среды.

Замечания и обсуждения к разделу 5.3:

Соискатель пишет: «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, ... разрыв не достиг ВАР.» Возникает вопрос, если разрыв не достиг ВАР, то воздействие инициирующего землетрясения ограничивается воздействием упругой волны. Но тогда это, видимо, значит, что область первого главного события была уже в критическом состоянии. Этот результат ассоциируется с результатами оппонента, что в области и первого, и второго главного события фиксируются особенности сейсмического режима, указывающие на подготовку землетрясения; напомним в этой связи, что области деформации и афтершоковых последовательностей двух главных событий также не пересекаются.

Соискатель пишет: «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». По-видимому, именно для соответствия этой модели (подвижка по прямоугольной площадке в Земле, (Pollitz, 1996)) заданы плоскости подвижек, не выходящие на поверхность земли (верхняя кромка на глубине 1.0, 0.5 км, ...): Но это предположение не вполне оправдано с физической точки зрения (большая по амплитуде подвижка как бы останавливается вблизи свободной поверхности) и противоречит фактическим данным (разлом виден на поверхности). Использование модели (Pollitz, 1996) объясняется соискателем тем, что важен учет сферичности и расслоенности Земли, что их неучет дает ошибку до 20%. Но скорее всего, такая погрешность имеет место только для глубоких землетрясений, да и так ли существенны 20% для проводимого сопоставления?

Для определения величин смещений по падению и простиранию на 58 элементах разбиения поверхности сейсмического разрыва соискателем использовано условие регуляризации. Условие это таково, что на каждой площадке не допускается существенное

отличие параметров подвижки от средних значений для всех площадок, и от решения подвижки по решению механизма очага. Это условие, вообще говоря, может быть слишком жестким. Известно, что очаговые области включают жесткие (асперити) и мягкие участки, и различия подвижек на них могут быть довольно существенными, вплоть, иногда, до смены знака смещений. Заметим, что на рис.5.7 смещения по данным РСА-интерферометрии (цветная карта) заметно более изменчивы вдоль разлома (более похожи на ситуацию с асперити), чем решение по модели смещений по площадкам для их верхней кромки (тот же рис.5.7).

Материалы 5-й главы дают четвертое защищаемое положение: «Новая модель поверхности разрыва землетрясения в Турции, произошедшего 6.02.2023 г. и постсейсмических процессов, полученная на основе методов дифференциальной интерферометрии и метода офсетов». К формулировке, по сути, претензий нет. Но редакционно она также представляется не вполне удачной; соискателем подчеркнута, что решение получено новым методом, но не сказано насколько она похожа на полученную стандартным способом, и чем она лучше или хуже.

Заключение оппонента.

Диссертация Бабаянца Игоря Павловича выполнена на очень актуальную тему, важную и в практическом, и в научном отношении. Диссертация обладает научной и методической новизной, содержит решение ряда практически важных задач. Хочется подчеркнуть, что в диссертации использованы принципиально новые подходы. Она особенно интересна в методическом плане, и не вызывает ни малейших сомнений как квалификационная работа. Напрашивается целый ряд возможных уточнений и развития представленных результатов. Сделанные оппонентом довольно многочисленные замечания не умаляют ценности работы, они во многом носят редакционный характер или являются пожеланиями на будущее.

Диссертация вполне соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от **24 сентября 2013 г. № 842**) для учёной степени кандидата наук, а её автор И.П. Бабаянц достоин присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9. Геофизика.

Я, Родкин Михаил Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

главный научный сотрудник лаборатории №1

Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

доктор физико-математических наук

Родкин Михаил Владимирович

Москва, 117997, улица Профсоюзная, 84/32

rodkin@mitp.ru; тел. +7 926 324 95 75

22 января 2024 года

Подпись М.В. Родкина заверяю:

Ученый секретарь ИТПЗ РАН

к.ф.-м.н. О.В.Селюцкая

