

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента к.т.н. Евсеева А.В.

на диссертацию **Бабаянца Игоря Павловича**

**«Поля смещений природных и техногенных объектов по данным спутниковой радарной интерферометрии: методика определения и интерпретации»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 – «Геофизика».

### ***1. Актуальность избранной темы диссертации.***

Важным аспектом обеспечения безопасности при освоении месторождений полезных ископаемых подземным способом является контроль деформаций подработанного массива. Традиционно для этого на земной поверхности выполняются геодезические измерения по профильным линиям. Вместе с тем, такой вид контроля требует значительных материальных и временных затрат, в результате информация о сдвигении имеется не по всей площади отработки, а оперативность получения данных является достаточно низкой.

В последнее время для мониторинга оседаний земной поверхности всё более широкое применение получает спутниковая радарная интерферометрия. Метод определения оседаний земной поверхности основывается на разности фаз двух циклов радиолокационной съемки в конкретной точке. 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. Вместе с тем, в области обработки спутниковых РСА снимков и интерпретации получаемых смещений остаётся ещё много нерешенных проблем. В связи с этим исследования автора диссертационной работы, посвященной совершенствованию методов обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии, является, несомненно, актуальной. Решение поставленных задач важно для повышения точности оценки смещений земной поверхности в процессе добычи полезных ископаемых и обеспечения безопасной эксплуатации объектов, находящихся в зоне подработки. Особое значение предложенная методика приобретает при ретроспективном анализе катастрофических событий техногенного и природного характера, проявившихся в виде деформаций земной поверхности, в тех местах, где не были заранее предусмотрены другие способы мониторинга.

## ***2. Научная новизна основных результатов диссертационной работы.***

Соискателем впервые разработана и обоснована численными расчётами технология обработки данных мониторинга, основанная на совместном применении двух методов обработки РСА-снимков и позволяющая одновременно оценивать смещения в высоко когерентных и низко когерентных областях.

В диссертационной работе впервые с применением геомеханических моделей выполнена оценка точности расчёта смещений земной поверхности по данным с одной и двух орбит над подземными хранилищами газа и калийными рудниками.

Новым научным результатом является построенная модель землетрясения в Турции, произошедшего 06.02.2023 г., позволяющая более чётко определить геометрию сейсмического разрыва и выполнить более достоверный прогноз сейсмической опасности в исследуемой области.

## ***3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе.***

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.

## ***4. Научная значимость и практическая ценность диссертационной работы.***

Научная значимость полученных соискателем результатов заключается:

– В разработке и обосновании численными расчетами технологии обработки спутниковых РСА-снимков и определении полей смещений в условиях обширных низкокогерентных областей;

– В оценке точности расчета смещений земной поверхности над подземными хранилищами газа и калийными рудниками по РСА снимкам с одной и двух орбит;

– В построении модели поверхности разрыва землетрясения в Турции, произошедшего 6.02.2023 г. и постсейсмических процессов, полученной на основе методов дифференциальной интерферометрии и метода офсетов.



Практическая ценность выполненных исследований не вызывает сомнения и заключается в следующем:

– С использованием разработанной методики обработки спутниковых РСА-снимков выделены области ускорения оседаний земной поверхности в пределах г. Березники и г. Соликамск. Сопоставление полученных результатов с наземными данными, включая геодезические измерения, показывает их хорошую сходимость;

– На основе выполненного анализа точности определения смещений земной поверхности по спутниковым снимкам показано, что при использовании данных с одной орбиты ошибка в восстановлении величины оседаний не превышает 10%, но области поднятий и оседаний оказываются сдвинутыми в сторону спутника относительно их истинного положения на 50-60 м. 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;

– Выполнен анализ землетрясения в Турции, произошедшего 6.02.2023 г., по спутниковым радарным снимкам. 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.

#### ***5. Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы.***

Результаты диссертационной работы целесообразно использовать при мониторинге деформационных процессов на горных предприятиях, ведущих добычу полезных ископаемых подземным способом, подземных хранилищах газа, а также на месторождениях углеводородов при анализе разработки и геолого-геомеханическом моделировании.

Результаты диссертационной работы могут использоваться также при изучении геодинамических явлений в земной коре, анализе причин, последствий, а также прогнозе опасных геологических процессов, в том числе, землетрясений научными организациями (Институтом физики земли РАН, Институтом земной коры СО РАН, Институтом динамики геосфер РАН, Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и др.).

#### ***6. Структура, редакция, стилистика и оформление диссертационной работы.***

Диссертационная работа соискателя структурно состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 97 наименований. Диссертационная работа

изложена на 126 страницах машинописного текста, включает 48 рисунков и 3 таблицы.

Диссертация представляет собой изложение результатов собственных исследований соискателя и обобщения современных публикаций по теме работы. Структура диссертационной работы построена логично, материал исследований изложен последовательно. Стил ь изложения результатов лаконичный, технически грамотный. Формулировки основных положений, выводов и рекомендаций логичные, обозначения - понятны и соответствуют общепринятым. Диссертационная работа хорошо оформлена, содержит необходимые разделы, наглядно иллюстрирована графиками и таблицами.

Автореферат отражает содержание диссертации.

#### ***7. Освещение основных положений диссертации в печати.***

Основное содержание диссертации достаточно полно отражено соискателем в 13 научных работ: шесть статей опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ (из них 3 – в списке Web of Science, 3 – в Scopus) и 7 публикаций в виде материалов конференций различного уровня.

#### ***8. Замечания и пожелания по диссертационной работе.***

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Автором выполнен теоретический анализ точности определения оседаний над подземными горными выработками, однако при наличии фактических данных о деформации земной поверхности полезно было количественно сравнить результаты, полученные различными методами и определить погрешность предлагаемого метода в конкретных условиях. Так же, для наглядности следовало привести рисунки, иллюстрирующие расхождение скоростей субвертикальных смещений, определенных по данным геодезии и методами интерферометрии.

2. В главе 4 сделан вывод, что "ошибка определения смещений восточной компоненты менее 1%", при этом не указывается разрешающая способность метода. Из такой формулировки можно сделать вывод, что повторяемость результатов измерений (погрешность) при измерении неподвижных участков земной поверхности по абсолютной величине будет стремиться к нулю, однако не надо упускать из внимания, что всегда присутствует некоторый относительно постоянный уровень шумов и помех.

3. В качестве замечаний следует также отметить мелкий масштаб рисунков 2 и 5 автореферата (рисунки 3.5 и 3.17 диссертации), что несколько затрудняет восприятие информации.

Замечания по диссертационной работе не носят принципиального характера, не снижают научную и практическую ценность полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку выполненных соискателем исследований.



### **9. Заключение по диссертационной работе.**

Диссертация **И.П. Бабаянца «Поля смещений природных и техногенных объектов по данным спутниковой радарной интерферометрии: методика определения и интерпретации»** представляет собой самостоятельно написанную квалификационную работу, выполненную на актуальную тему и обладающую научной новизной и практической ценностью, в которой разработана технология оценки смещений земной поверхности по данным спутниковой РСА-интерферометрии, выполнена оценка точности определения величины оседаний, и даны рекомендации по обработке данных. Результаты работы использованы при мониторинге оседаний над рудниками Верхнекамского месторождения калийных солей и при изучении катастрофических землетрясений в Турции.

Диссертация 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, Евсеев Антон Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

*Официальный оппонент*

*старший научный сотрудник лаборатории*

*физических процессов освоения георесурсов*

*«Горного института Уральского отделения РАН» – филиала*

*Федерального государственного бюджетного учреждения*

*науки Пермского федерального исследовательского центра*

*Уральского отделения РАН*

*кандидат технических наук*

*Антон Владимирович Евсеев*

*614007, г. Пермь, Сибирская, д. 78а*

*evseev@mi-perm.ru*

*тел. +7 902 47 43496*

*15 января 2024 года*

*Подпись старшего научного сотрудника лаборатории физических процессов освоения георесурсов «Горного института Уральского отделения РАН» – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН Евсеева Антона Владимировича удостоверяю.*

*Главный специалист по кадрам*



*С.Г. Дерюженко  
«16» января 2024 г.*