ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук Певнева Анатолия Кузьмича о диссертации Мельникова Андрея Юрьевича на тему: «Разработка методики анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.32 «Геодезия»

Диссертация Андрея Юрьевича Мельникова направлена на решение задачи, имеющей значение для развития современной геодезии, сегодня все более приобретающей характер динамической геодезии по классификации М.С. Молоденского.

Согласно официальной формуле специальности геодезия, ее содержанием является «определение формы и размеров Земли, ее гравитационного поля, пространственных характеристик природных и техногенных объектов, явлений и процессов на ее поверхности, … , а также установление закономерностей их пространственно-временных изменений».

Последнее положение формулы имеет в данном случае ключевое значение, так как соискатель построил свои исследования, ставя перед собой цель именно изучения закономерностей процессов деформации земной поверхности в связи с сильными землетрясениями. Так как по современным представлениям землетрясение представляет собой деформационный процесс, то для целей его изучения естественно применять именно геодезические наблюдения, что и делается в работе соискателя.

Для достижения поставленной цели А.Ю. Мельников вполне обоснованно приступает к решению и успешно решает задачу разработки методики анализа деформации земной поверхности на основе использования результатов современных высокоточных спутниковых геодезических измерений. Опробование методики на реальных измерительных данных позволило проследить эволюцию деформации земной поверхности на протяжении более 10 лет в сейсмоактивном регионе планеты.

Актуальность исследований соискателя в социальном аспекте связана с такой целью «Стратегии национальной безопасности Российской Федерации», как защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. В научном аспекте актуальность работы заключается в реализации новых возможностей использования результатов наблюдений глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС), связанных с возрастанием их точности, непрерывным увеличением их пространственно-временного распределения и создания открытых мировых баз данных в виде современных веб-сервисов.

Использование указанных возможностей в анализе движений и деформаций земной поверхности является весьма своевременным и эффективным. Автор последовательно строит свою работу, начиная с анализа точности современных высокоточных спутниковых координатных определений (Precise Point Positioning - PPP), с целью оценки их приемлемости для геодинамических исследований,

разрабатывая алгоритм методики анализа данных, реализовывая его программно и завершая выявлением важных закономерностей в связи с ходом сейсмической активности исследуемой территории. Можно с уверенностью утверждать, что диссертация А.Ю. Мельникова **является цельной и завершенной научной работой.**

Диссертация содержит 152 страницы и состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы из 180 наименований и 3 приложений. Основное содержание работы опубликовано в шести ведущих рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК и международные системы цитирования Web of Science и SCOPUS. Автореферат достаточно полно освещает содержание диссертации.

Количество использованных диссертантом научных литературных источников весьма впечатляет.

Во введении соискатель раскрывает общее содержание работы, ее цель и задачи, обосновывает актуальность, научную новизну, практическую значимость, формулирует защищаемые положения.

Первая глава диссертации А.Ю. Мельникова имеет подготовительный характер для проведения основных разработок и исследований. В ней автор описывает технологические особенности современного и эффективного метода спутниковых геодезических координатных ГНСС определений, что представляет собой интересную методическую разработку, полезную в учебном процессе ВУЗовской геодезической подготовки. На наш взгляд, наиболее важным результатом исследований первой главы является анализ точности метода PPP-определений, с целью оценки возможности его применения для геодинамических исследований и использования его результатов в разработанной авторской методике анализа эволюции движений и деформаций земной поверхности в связи с сильными сейсмическими событиями. Исследование точности включило в себя статистический анализ выборки из более чем 10 тысяч значений разностей определения приращений координат двумя независимыми методами, что свидетельствует о степени представительности и эффективности полученных оценок. Автор получает убедительные оценки точности метода PPP - определений, свидетельствующие о допустимости его применения в геодинамических исследованиях, где необходимо получение максимально высокой точности. Получены средние квадратические ошибки планового и высотного положений 3 и 8 мм, соответственно. Это дает основание соискателю приступить к разработке новой методики анализа деформационного процесса с использованием результатов суточных PPP-определений, содержащихся в мировом веб-сервисе временных рядов координат геодезических пунктов.

Вторая глава диссертации описывает процедуру разработки авторской методики анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений. Методика содержит такие основные элементы; как сбор результатов координатных определений из современных веб-архивов; сбор цифровых данных о сейсмической активности и разломной тектонике; предварительная подготовка наблюдений к вычислению и анализу деформаций; собственно вычисление

деформаций и их площадное интерполирование, получая цифровые модели деформаций на каждые сутки измерений, а также положений эпицентров землетрясений и активных разломов; создание графических моделей деформации; получение кинематического представления деформационного процесса.

Методика разработана впервые, является оригинальной и не повторяющей предшествующие разработки. Наиболее близкими, но не идентичными являются: методика получения аналогичных моделей по данным разностных ГНСС определений без учета цифровой информации о сейсмичности и разломной тектонике (Кафтан, Красноперов, Юровский, 2010); и программный пакет Greed_Strain итальянских авторов 2008 года создания. Коренные отличия указанных разработок от вновь созданной заключаются в их неприспособленности к прямому (без существенных доработок) использованию веб-архивов временных рядов высокоточных PPP-определений, отсутствии возможности использования цифровой информации о сейсмичности и разломной тектонике, отсутствии блоков отбраковки грубых ошибок и устранения разрывов в данных. Функциональное отличие морально устаревших разработок около-десятилетней давности от авторской убедительно продемонстрировано в диссертации. Существенным недостатком пакета Greed_Strain является вычисление деформаций земной поверхности по интерполированным, а не по точным значениям смещений геодезических пунктов. За счет чего точные значения не используются при вычислении деформаций, в то время как в методике А.Ю. Мельникова они сохраняются. Большим достоинством методики и программного обеспечения является их отечественная принадлежность.

Для опробования разработанной методики соискатель выбирает уникальный район, хорошо обеспеченный густой сетью непрерывных пунктов ГНСС, в пределах которого произошло сильное историческое землетрясение. Результаты высокоточных PPP-определений здесь имеют продолжительность более десяти лет и открыты для общего доступа. С использованием оригинальной методики автор получает временные последовательности цифровых моделей движений и деформаций земной поверхности. Собирая полученные последовательности в единый видеофильм, соискатель реализует возможность анализа пространственно-временной эволюции процесса деформирования земной поверхности совместно с изменениями сейсмической активности и расположением активных разломов региона.

Параллельно автор осуществил дополнительные исследования характера деформирования земной поверхности в связи с двумя сильными сейсмическими событиями Западного побережья Северной Америки с использованием методик других авторов. Это позволило сопоставить пространственно-временные особенности развития деформационных процессов в связи с тремя сильными землетрясениями, а также сравнить производительность прежней и вновь созданной методик. Показано, что разработанная методика более совершенна за счет сокращения времени на анализ, и использования геодезических данных в едином комплексе с данными смежных научных дисциплин. В разработанной методике применяется масштабирование деформаций к заданной площади

треугольников, что представляет собой новый и эффективный аналитический прием.

Диссертантом обнаружены новые интересные закономерности протекания деформаций земной поверхности до, во время и после сильных землетрясений. Показано наличие деформационных аномалий, возникающих за годы и месяцы до землетрясений в местах их реализации.

Анализ деформационных предвестников не позволил выявить устойчивых закономерностей, способствующих предсказанию будущих сейсмических событий, но полученные результаты вносят значительный вклад в решение задачи предсказания землетрясений по геодезическим наблюдениям.

Третья глава диссертационной работы логично дополняет основную разработку диссертации. В ней автор описывает исследования области применения разработанной методики. Показано, что методика позволяет анализировать протекание деформационных процессов в сейсмоактивных районах, но виду того, что область проявления сильных землетрясений является локализованной, необходимо понимать, в каком месте строить или использовать существующую наблюдательную сеть, а также как оценивать характер критических деформаций, приводящих к разрушительным землетрясениям.

Здесь автор опирается на понятие сейсмического цикла, которое предполагает, что сильные землетрясения повторяются в локализованных областях радиусом от десятков до сотен километров. Это обстоятельство дает основание концентрировать (строить или использовать существующую) наблюдательную геодезическую сеть вокруг эпицентров уже произошедших сильных сейсмических событий. Для ограничения размера наблюдательной сети автор предлагает использовать исследования и оценки радиуса возникновения деформационных предвестников Добровольского.

Очевидно, что для объективной оценки уровня наблюдаемых деформаций и их опасности в связи с подготовкой землетрясения, необходимо оценить этот уровень и установить момент начала их накопления. Для этого автор, опираясь на теорию упругой отдачи, устанавливает уровни критических деформаций, анализируя геодезические результаты их оценки предшественниками и собственные данные. Автор подтверждает, что перед сильными землетрясениями в их эпицентральных зонах накапливаются деформации 10^{-5} и более. Таким образом, у соискателя складывается подход к анализу деформаций в сейсмоактивных районах. Его положения таковы, что пространственно-временной анализ деформационного процесса следует организовывать в зонах возникновения сильных исторических землетрясений, ограничивая их радиусом зон проявления деформационных предвестников, а начальную эпоху регистрации деформаций выбирать вблизи моментов возникновения предыдущих землетрясений этой ограниченной области. Это обеспечит в будущем контроль накопления деформаций в районе подготовки сейсмических событий и оценку уровня опасности возникновения и магнитуды очередного землетрясения.

В заключении автор обобщает основные результаты проведенных исследований и разработок, делает главные выводы, вытекающие из решения

поставленных задач, представляет рекомендации и описывает перспективы дальнейших исследований по теме работы.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в обогащении геодезической теории новой эффективной методикой анализа деформационного процесса. Анализ точности метода PPP расширяет область его применения для решения задач геодезической геодинамики.

Возможность использования разработанной методики и рекомендаций по ее применению в едином комплексе исследований по оценке сейсмической опасности представляет значительную **практическую ценность**.

Научная новизна представлена оригинальной и эффективной методикой анализа деформационного процесса, а также обоснованием применения метода PPP в геодинамических исследованиях.

Достоверность результатов подтверждается строгостью математического аппарата, контрольными расчетами, оценками точности, а также публикациями в рейтинговых рецензируемых журналах и результатами их обсуждения на научных симпозиумах, конференциях и семинарах.

По содержанию диссертации имеются следующие замечания:

- Представленное в первом разделе описание принципов и ошибок PPP - определений можно считать излишним, не смотря на то, что данный раздел представляет интерес в методическом плане.
- При учете весов в авторской оценке точности PPP-определений из сравнения с разностным методом, вероятно, лучше было использовать оценки средних квадратических ошибок, полученные из проведенного анализа научных публикаций. Представляется, что искомые оценки могли бы быть более объективными.
- Формулы оценки точности искомых деформаций в диссертации не приведены, хотя имеются ссылки на публикации, в которых эти формулы представлены.
- У рисунка 2.2 легенда не слишком подробная, что затрудняет понимание. Рисунок 2.4 также требует дополнительных объяснений.
- Рисунки 2.12 и 2.13 представляются избыточными и не существенной информации вносящими в содержание работы.
- В третьей главе не достаточно подробно раскрыта модель накопления деформаций в очаге землетрясения, хотя ссылки на соответствующие публикации и некоторые цитирования приводятся.
- Рис. 3.8 не слишком убедительно демонстрирует проявление деформационного предвестника, хотя определенное сходство имеет место.
- Остается открытым вопрос отнесения начальной эпохи регистрации накопления деформаций к моменту возникновения предшествующего землетрясения, или к завершению процесса постсейсмической релаксации.

Диссертационная работа соискателя является завершенной научно-квалификационной работой. В ней изложены новые научно обоснованные технологические решения по проведению и анализу наблюдений за движениями и деформациями земной поверхности в сейсмоактивных районах, что имеет

существенное значение для геодезических исследований в интересах общественной безопасности и экономики страны.

Диссертационная работа Мельникова Андрея Юрьевича на тему: «Разработка методики анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений» соответствует пункту 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ, утвержденного постановлением Правительства РФ за №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.32 – Геодезия.

Официальный оппонент
Доктор технических наук Певнев Анатолий Кузьмич

5.08.2019

Информация об оппоненте:
Организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН (ФГБУН ИФЗ РАН)
Структурное подразделение: Лаборатория физики колебаний пробных масс (602)
Должность: Главный научный сотрудник
Почтовый адрес: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр.1, к.133.
Телефон: 8-499- 254-23-50
Адрес электронной почты: pevnev@ifz.ru, an.pevnev@yandex.ru
Шифр и наименование специальности, по которой защищена диссертация: 05.24.01 «Геодезия».

Подпись Ф.И.О. оппонента заверяю.
Заведующий отделом кадров ФГБУН ИФЗ РАН

ОТДЕЛ КАДРОВ

Назарова Н.Г.