

## **Отзыв официального оппонента**

на диссертацию Сдельниковой Ирины Александровны «Пространственно-временные вариации деформационных процессов в зонах субдукции», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

**Актуальность работы. Объект и предмет исследований.** В представленной работе предложены подходы по развитию методов изучения деформаций земной коры с использованием средств глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС). Рассматривается связь временного ряда коровых деформаций с проявлением сильных сейсмических событий на разных стадиях их реализации. Для данной тематики исследований выбрана Курило-Камчатская и Японская субдукционные зоны, которые охарактеризованы многолетними данными непрерывных космогеодезических наблюдений. Кроме того здесь максимально проявлены коровые деформации, катастрофические землетрясения и цунами. Диссертация актуальна для решения фундаментальных вопросов геофизики, геодинамики и сейсмологии. С точки зрения предсказания и своевременного оповещения населения о возможности проявления разрушительных природных явлений эта работа может представлять практический жизненно важный интерес.

**Цель и задачи исследований.** Диссертация Сдельниковой И.А. посвящена изучению пространственно-временных вариаций межплитных деформаций в субдукционных регионах и выявлению особенностей таких деформаций на разных стадиях сейсмического цикла по данным ГНСС. В качестве основных задач исследования автор рассматривает разработку подходов к анализу и интерпретации приповерхностных смещений по данным спутниковой геодезии; выбор физических и соответствующих им математических моделей исследуемых процессов; моделирование межплитных деформаций на основе разработанных автором вычислительных алгоритмов; анализ корректности и физической обоснованности полученных результатов.

Для оценки цели и задач, поставленных в диссертации, следует напомнить, что на рубеже 20-21 веков наблюдалось экстенсивное применение высокоточного ГНСС позиционирования для геодинимических исследований, развертывались специализированные и опорные GPS сети по всему земному шару. По мере накопления необходимого набора данных рассчитывались средние векторы скорости за несколько лет для наблюдаемых реперов. Это позволило оценить средние кинематические и деформационные тенденции для различных приповерхностных участков земной коры. К настоящему времени уже накоплены данные за 10-20 и более лет эпизодических и непрерывных ГНСС наблюдений, что позволяет переходить к исследованию временных вариаций напряженно-деформированного состояния отдельных территорий.

С этой точки зрения работа Сдельниковой И.А. находится на переднем крае в области разработки методов практического использования и анализа временных рядов высокоточного позиционирования, в вопросах исследования субдукционных зон, генезиса и предсказания здесь сильных землетрясений и цунами. На мой взгляд, полнота достижения поставленной цели, корректность теоретических исследований и достоверность полученных результатов в диссертации не вызывают серьезных вопросов. В качестве критических ограничений предложенного метода и результатов выступает необходимость наличия: многолетних ГНСС наблюдений; равномерного распределения ГНСС реперов по исследуемой площади; данных по строению и кинематике нижних частей земной коры; данных сейсмологических наблюдений.

**Структура работы и основные результаты.** Диссертация Сдельниковой И.А. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы и двух приложений (116 стр.).

Во *введении* сформулированы цели и задачи исследований, обоснованы актуальность и научная новизна, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* представлен обзор работ по изучению субдукционных регионов. В течение длительного времени деформационный потенциал зон

субдукции оценивался на основе геологических, сейсмологических и данных глобальной кинематики литосферных плит. Применение методов спутниковой геодезии позволило детализировать пространственно-временные особенности деформационных процессов в зонах субдукции. В данных ГНСС проявляются межсейсмическая, сейсмическая и постсейсмическая фазы сильных событий; есть перспективы по работе с выявлением предсейсмической фазы.

Во *второй главе* описана предложенная методология по моделированию пространственно-временных вариаций субдукционных деформаций с использованием ГНСС данных. Для выделения именно межплитной деформации к исходным временным рядам координат применен регрессионный анализ. Вариации по пространству выявляются путем дискретизации межплитной контактной зоны и использования дислокационных моделей. Обратная задача по оценке пространственного распределения деформаций в межплитной контактной зоне решается на основе данных о смещениях земной поверхности путем регуляризации и наложения некоторых ограничений.

В *третьей главе* на основе предложенного автором подхода исследуются пространственно-временные вариации межплитных сцеплений в Курило-Камчатской зоне субдукции по ГНСС данным. Показаны особенности здесь межплитных деформаций на время Симуширских землетрясений 2006-2007 гг. и после них. После указанных событий отмечается значительное ослабление межплитового сцепления в очаговой зоне, что свидетельствует о разгрузке накопленных напряжений и является характерным для постсейсмической стадии. Юго-западный и северо-восточный фланги Курильской гряды, по мнению автора, проявляют стационарный характер межплитового сцепления слабо меняющийся во времени, что характерно для межсейсмической стадии. Отсутствие данных ГНСС перед Симуширскими землетрясениями не позволило автору провести исследование предсейсмического периода для этих событий.

В *четвертой главе* предложенный автором подход применен к исследованиям пространственно-временного распределения межплитных сцеплений в районе Японской зоны субдукции. На основе значительно более

богатого исходного ГНСС материала здесь удалось рассмотреть вопрос о существовании предсейсмических признаков подготовки сильнейшего землетрясения Тохоку (2011г). При этом зафиксированы как локальные временные вариации в зоне максимального сцепления, так и вариации, охватывающие всю сейсмофокальную зону, которые могут служить признаком подготовки данного события. После Симуширских событий и землетрясения Тохоку отмечается сходное ослабление межплитного сцепления в очаговой зоне, что может быть вполне логичным состоянием для постсейсмической стадии.

В *пятой главе* рассматривается вопрос о практическом применении данных ГНСС для оперативного мониторинга сильнейших субдукционных землетрясений и их цунамигенного потенциала. Выполнено моделирование распределения подвижек в очагах рассматриваемых 3-х землетрясений, а также вертикальных косейсмических смещений дна океана в эпицентрах этих событий. При получении данных ГНСС в режиме реального времени возникает возможность оперативного выявления цунамигенных ситуаций и своевременного предупреждения населения об опасности.

Таким образом, в диссертации Сдельниковой И.А. предложен новый подход к моделированию пространственно-временного распределения межплитного сцепления для зон субдукции. При этом расширена сфера практического применения данных спутниковой геодезии. Полученные оценки пространственно-временных вариаций межплитных взаимодействий в сопоставлении с данными по развитию сейсмического процесса позволили выявить деформационные особенности на разных стадиях сейсмического цикла. Показана возможность отслеживания этапов подготовки и возникновения сильнейших субдукционных землетрясений и цунами при надлежащей организации геодинамического мониторинга. Что является важным практическим приложением полученных результатов. Идея комплексного анализа приповерхностного ГНСС позиционирования и данных о кинематическом строении нижележащей коры может способствовать развитию методов экстраполяции структуры современных движений на глубину.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается применением статистических критериев согласованности, проведением тестов на устойчивость, согласованностью с результатами на основе телесеismicких данных из других работ.

**Замечания по работе.** Наряду с общей высокой положительной оценкой представленной диссертации необходимо отметить ряд критических замечаний:

- Во Введении в качестве основных сейсмоактивных регионов с развитой инфраструктурой спутниковых геодезических измерений не упомянута крупная Центрально-Азиатская GPS сеть, которая имеет территориальный охват  $\sim 2$  млн. кв. км, количество пунктов  $> 750$  и наблюдается с 1992г.
- В главе 2 описание предлагаемого метода оценки межплитного сцепления выполнено несколько небрежно и не достаточно четко систематизировано. В одном абзаце величина  $U_{lock}$  названа деформацией нижнего края континентальной плиты, затем скоростью деформирования, а в конце – скоростью смещений. Вообще  $U$  и  $u$  – это деформация, скорость деформации, скорость или смещение? Как  $U$  и  $u$  соотносятся с  $V$ ? Отсюда и далее в работе присутствует путаница терминов, из текста до конца не понятен физический смысл искомого параметра для оценки межплитного сцепления, и проводимых аналитических манипуляций с временными рядами входных ГНСС координат.
- В разделе 2.3 (стр.51) *"Из-за большей погрешности определения вертикальной составляющей смещений станций ГНСС, в расчетах применяются только данные по горизонтальным компонентам."* Не указаны количественные показатели вынужденного отказа от вертикальной компоненты, смотри следующее замечание.
- В разделе 3.3 (стр.63) *"Статистически значимое выделение таких вариаций возможно при достаточно продолжительном периоде осреднения, который значительно превосходит характерный период инструментальных шумов. Период осреднения, обеспечивающий приемлемую точность результирующих скоростей, составляет 1 год."* Из

приведенной в работе информации не понятно *Статистически значимое* – насколько?; *период инструментальных шумов* – что понимается и какой уровень?; *приемлемую точность результирующих скоростей* – какая в мм/год? В 3 и 4 главах не указано на основе какой программы получены координаты позиционирования ГНСС реперов и их точность, что могло бы значительно прояснить эту ситуацию.

- В разделе 2.1.2 (стр.39-40) вызывает неприятие "*Профиль зоны контакта представляет собой поверхность...*", что также фигурирует на рис. 2.3 и 3.2. Профиль – это вид сбоку, сечение или разрез; что справедливо присутствует на рис. 3.9 и 4.9. А в предыдущих случаях **в плане** отражена поверхность погружающегося фронта (слэба) океанической плиты.
- На 9 рисунках (1.7, 3.6, 3.7, 3.8, 3.10, 4.6, 4.7, 4.8, 5.2) для временных рядов смещений и векторов скорости не указаны системы отсчета и оценка точности (СКО). Что важно для более полной оценки движений репера.
- Глава 3, рис. 3.10. *Пространственно-временные вариации межплитового сцепления в районе Курило-Камчаткой зоны субдукции*. Слабым звеном здесь является линейное расположение станций ГНСС вдоль простираения зоны субдукции и допущение монотонного убывания по глубине искомого параметра. При этом скорость убывания в тексте не обоснована. Для этого можно было воспользоваться ГНСС данными большого количества станций о. Хоккайдо или других ближайших пунктов.
- На Рис. 4.2 не обозначены единицы измерения изолиний, а на рисунках 5.2, 5.3 и 5.4 глубины отсутствуют масштабные шкалы для оперативной оценки размеров очага подвижки в результате землетрясений. В разделе 5.2 есть ссылка на алгоритм в несуществующем разделе 2.2.2.

**Заключение.** Несмотря на высказанные замечания, диссертация заслуживает высокой общей оценки и является вполне законченным научно-квалификационным исследованием. Все выводы и защищаемые положения обоснованы и вытекают из обширного фактического материала и получены с помощью проверяемых математических подходов. Представленные материалы

нашли свое отражение в публикациях автора в периодических научных изданиях и апробированы в ходе выступлений на различных конференциях. Автореферат в полной мере отражает основное содержание работы.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности, так как представляет собой исследования, направленные на геодинамическую интерпретацию движений земной коры с использованием ГНСС данных.

Диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ, утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., для учёной степени кандидата наук, а её автор Сдельникова Ирина Александровна заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

**Официальный оппонент:**

заведующий лабораторией изучения современных движений земной коры методами космической геодезии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научная станция РАН в г. Бишкеке,

кандидат физико-математических наук

Кузиков Сергей Иванович

Я, Кузиков Сергей Иванович, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

720049, Кыргызстан, Бишкек-49, Научная станция РАН

Тел.: +996 (312) 61-31-40

E-mail: ksi@gdirc.ru

«3» сентября 2018 года

Подпись С.И. Кузикова заверяю:

*Верующий*  
*по кадрам*



*Абдумурзимова Э. А.*