

На правах рукописи



**Сдельникова Ирина Александровна**

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ  
ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ**

Специальность 25.00.10 Геофизика, геофизические  
методы поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Обнинск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре Единая Геофизическая служба Российской академии наук в секторе геодинамического мониторинга.

Научный руководитель: **Стеблов Григорий Михайлович,**  
профессор РАН, доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории спутниковых методов изучения геофизических процессов

Официальные оппоненты: **Тимофеев Владимир Юрьевич,**  
доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией физических проблем геофизики

**Кузиков Сергей Иванович,**  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке, заведующий лабораторией изучения современных движений земной коры методами космической геодезии

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук**

Защита состоится 27 сентября 2018 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 002.001.01 при ИФЗ РАН по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте [www.ifz.ru](http://www.ifz.ru). Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации [vak.ed.gov.ru](http://vak.ed.gov.ru) и на сайте института [www.ifz.ru](http://www.ifz.ru).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» июля 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Деформации в зонах субдукции связаны с наиболее активными геодинамическими процессами на Земле. Большая часть сейсмической энергии Земли выделяется именно в зонах субдукции. Здесь происходят самые глубокие и самые сильные землетрясения. Сильнейшие землетрясения в каждой зоне субдукции происходят довольно редко и высвобождают огромное количество напряжений, накопленных за сотни или даже тысячу лет, приводя к разрушительным последствиям. Однако, наибольшую угрозу представляют сильнейшие мелкофокусные субдукционные землетрясения с магнитудами  $M \geq 8$ , эпицентры которых расположены в акваториях между глубоководными желобами и островными дугами, и которые, как следствие, сопровождаются цунами.

В настоящее время для изучения деформаций земной поверхности широко применяются методы космической геодезии. Высокая точность современных спутниковых геодезических измерений и достаточно густые сети в ряде подвижных регионов предоставили возможность изучения не только пространственных, но и временных вариаций деформационных процессов в зонах субдукции. Это позволяет изучать связь деформаций с развитием сейсмичности и выявлять особенности деформационных процессов на разных стадиях сейсмического цикла, и в частности, на стадии подготовки сильнейших землетрясений. Таким образом, изучение пространственно-временных вариаций деформационных процессов в зонах субдукции является актуальной задачей современной геофизики в свете проблем снижения рисков и смягчения последствий от сильнейших сейсмических событий, в том числе цунамигенных.

**Целью** данной работы является выявление особенностей деформаций в зонах субдукции на разных стадиях сейсмического цикла и, в частности, на стадии подготовки сильнейших землетрясений.

Для достижения данной цели необходимо было решить следующие **основные задачи:**

1. Изучить существующие подходы к оценке сейсмогенерирующих свойств зоны субдукции в опубликованных ранее работах.

2. Произвести выборку и обработку исходных временных рядов спутниковых геодезических измерений, необходимых для выявления деформаций земной поверхности на разных стадиях сейсмического цикла.

3. Сделать обоснованный выбор физических и математических моделей для описания деформационных процессов в зонах субдукции.

4. Выполнить оценку пространственно-временного распределения деформаций в межплитовой контактной зоне в районе Курильских островов и Японии для выявления особенностей деформационных процессов в исследуемых регионах.

5. Проанализировать корректность использованного подхода на примере Курило-Камчатской и Японской зон субдукции.

6. Соотнести полученные распределения режимов сцепления с распределением сеймотектонических деформаций в очагах сильнейших землетрясений.

**Научная новизна.** В настоящей диссертационной работе предложен подход к анализу и интерпретации деформационных процессов в зонах субдукции по данным космической геодезии. Разработана методология анализа временных вариаций поверхностных смещений, интерпретация которых служит основой для построения пространственно-временных вариаций деформаций в межплитовой контактной зоне.

Предложенная методология была использована для изучения пространственно-временного распределения деформаций в Курило-Камчатской и Японской зонах субдукции. Проанализированы различия деформационных процессов для отдельных сегментов Курильской дуги. Показана возможность выявления процесса подготовки сильнейшего межплитового землетрясения по данным космической геодезии. Исследована возможность применения спутниковых геодезических данных, получаемых в режиме реального времени, для оперативного оповещения о цунами.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Существует устойчивое обоснованное решение задачи определения характеристик межплитового сцепления в зонах субдукции по поверхностным смещениям.

2. Исследованные области Курило-Камчатской и Японской зон субдукции характеризуются сочетанием как участков полного сцепления, так и зон свободного скольжения, что исключает возможность полного сцепления всей сейсмофокальной зоны.

3. Великое Японское землетрясение 2011 г., субдукционного типа, предварялось пространственно-временными вариациями распределения межплитового сцепления, которые могут служить индикатором подготовки такого события.

4. Сильнейшие землетрясения вызывают перераспределение межплитового сцепления и его значительное ослабление, что свидетельствует о разгрузке накопленных напряжений.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Изучение особенностей пространственно-временных деформаций в сейсмически активных регионах позволяет расширить понимание процессов, приводящих к возникновению сильнейших землетрясений.

Выявление процесса подготовки дает возможность делать предположения о месте и времени возникновения сильнейших землетрясений. Локализация землетрясения по пространству позволяет выявлять цунамигенность данного события. А выявление возможной площади землетрясения позволяет оценить силу землетрясения и интенсивность цунами.

В работе показана возможность практического применения спутниковых геодезических данных для оперативного определения поднятия дна океана вследствие подводных субдукционных землетрясений с целью определения кинематических характеристик возникающей волны цунами для задач раннего оповещения о цунами.

**Достоверность** полученных в диссертационной работе результатов достигается за счет корректной фильтрации исходных измерений, выбором

адекватных математических и физических моделей исследуемых процессов, устойчивостью численных методов решения поставленных задач, применением общепринятых методов регуляризации некорректных обратных задач, применением статистических критериев согласованности и тестов на устойчивость.

**Личный вклад автора.** Основные результаты, полученные лично диссертантом в ходе выполнения работы, включают:

1. Обзор ранее выполненных исследований по тематике диссертации.
2. Подбор спутниковых геодезических измерений.
3. Разработка всех необходимых алгоритмов, включая адаптацию и модификацию существующих.
4. Создание программных кодов для реализации разработанных алгоритмов и промежуточного анализа результатов.
5. Графическое представление окончательных результатов.

Анализ полученных результатов и формулировка основных выводов проводились совместно с научным руководителем – профессором РАН, д.ф.-м.н. Г.М. Стебловым.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований были представлены на семинарах ФИЦ ЕГС РАН, а также на ряде международных и всероссийских конференций, в том числе на:

- Десятой уральской молодежной научной школе по геофизике, Пермь, 2009 г.;
- Научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, Москва, 2014 г.;
- Научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, Москва, 2015 г.;
- Научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, Москва, 2016 г.;
- Четвертой тектонофизической конференции в ИФЗ РАН «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле», Москва, 2016 г.;
- Международной конференции “Global Challenges and Data-Driven Science” (CODATA 2016), Сочи, 2016 г.;
- XII Международной сейсмологической школе, г. Алматы (Казахстан), 2017 г.;
- международной конференции “Global Challenges and Data-Driven Science” (CODATA 2017), Санкт-Петербург, 2017 г.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК. Еще одна публикация принята к печати в журнал «Вулканология и сейсмология».

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы и двух приложений. Общий объем работы составляет 116 страниц машинописного текста (без приложений), включая 42 рисунка и 2 таблицы. Список литературы содержит 149 библиографических наименований.

**Благодарности.** Автор искренне выражает благодарность своему научному руководителю – главному научному сотруднику лаборатории спутниковых методов изучения геофизических процессов ИФЗ РАН, заведующему сектором геодинамического мониторинга ФИЦ ЕГС РАН, д.ф.-м.н., профессору РАН *Григорию Михайловичу Стеблову* за неоценимую помощь на всех этапах выполнения работы.

Автор выражает благодарность д.т.н., члену-корреспонденту РАН *Алексею Александровичу Маловичко*, к.г.-м.н. *Сергею Владимировичу Горожанцеву* и к.т.н. *Юрию Анатольевичу Виноградову* (ФИЦ ЕГС РАН) за поддержку и проявленный интерес к работе; д.ф.-м.н., профессору *Юрию Олеговичу Кузьмину* и д.ф.-м.н., профессору *Валентину Олеговичу Михайлову* за внимательное обсуждение работы и ценные советы по ее дополнению; д.ф.-м.н. профессору *Игорю Александровичу Гарагашу*, д.г.-м.н., профессору *Евгению Александровичу Рогожину*, д.ф.-м.н. *Иосифу Липовичу Гуфельду*, к.ф.-м.н. *Игорю Михайловичу Алёшину* (ИФЗ РАН) за плодотворные дискуссии и проявленный интерес к работе; к.ф.-м.н. *Виталию Викторовичу Погорелову*, *Евгению Альбертовичу Фаттахову*, *Ларисе Витальевне Афанасьевой* (ИФЗ РАН) за практическое содействие и внимание к ходу выполнения исследований; своим коллегам к.ф.-м.н. *Юрию Владимировичу Габсатарову* и к.ф.-м.н. *Ирине Сергеевне Владимировой* (ФИЦ ЕГС РАН) за поддержку и ценные советы по улучшению работы.

Работа была частично поддержана грантом РФФИ № 17-35-50036.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

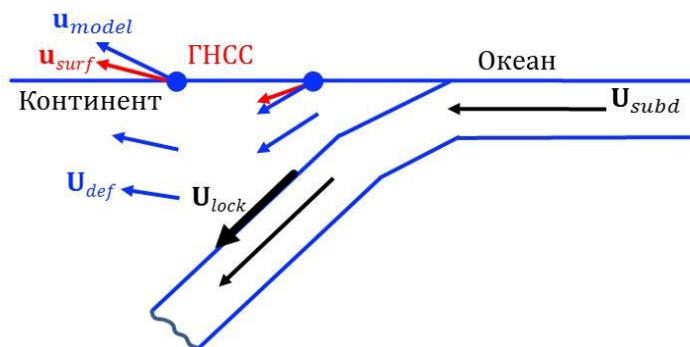
В **первой главе** дано описание тектонических процессов в зонах субдукции и показано развитие представлений о природе деформаций, приводящих к сильным землетрясениям.

Самые сильные землетрясения на Земле происходят именно в субдукционных зонах и высвобождают большую часть сейсмической энергии. Попытки охарактеризовать количественно состояние зон субдукции, представить, как в них реализуется деформационный потенциал, предпринимаются уже не одно десятилетие. До середины 1990-х годов динамика субдукционных регионов в основном анализировалась по совокупности данных об их сейсмичности и представлениях о глобальной кинематике литосферных плит. Появление и широкое развитие методов космической геодезии, основанных на глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС), предоставило обширный материал для изучения деформационных процессов в сейсмически активных регионах, например: Япония, Суматра, Чили, Курилы и т.д. Временные ряды изменения положений станций, расположенных в деформационных поясах вблизи границ литосферных плит, отражают суммарное действие процессов различного происхождения. Разделение всех этих составляющих во временных рядах возможно благодаря тому, что действие всех этих процессов имеет различные характерные признаки во временной зависимости. По спутниковым геодезическим измерениям выделяются сейсмическая, постсейсмическая и межсейсмическая фазы сейсмического цикла, однако выделение предсейсмической фазы является вопросом дискуссионным, решение которого приблизило бы нас к пониманию природы процессов подготовки сильных землетрясений.

В данной работе изучение деформационных процессов в зонах субдукции основано на представлении, согласно которому распределение деформаций в нависающей континентальной окраине и, в частности, на ее поверхности

определяется скоростью поддвига под нее океанической литосферы и степенью их взаимного сцепления (рис. 1). Если скорость взаимного смещения плит можно считать стабильной в течение периода, на много порядков превосходящего период наблюдений в несколько лет, то в отношении межплитового сцепления следует допустить заметные вариации во времени, обусловленные как медленным межсейсмическим перераспределением, так и быстрым перестроением в ходе землетрясений. Для количественного описания межплитовых деформаций в зонах субдукции представляется целесообразным использовать коэффициент межплитового сцепления, который определяется как отношение скорости смещения нижнего края нависающей плиты к скорости взаимного смещения плит:  $U_{lock}/U_{subd}$  (рис. 1). Значение  $U_{lock}/U_{subd}$  равное 1 соответствует полному сцеплению, равное 0 – свободному проскальзыванию. Промежуточные значения между 0 и 1 данного коэффициента соответствуют областям, в которых наблюдается частичное проскальзывание. Исходя из такой модели, пространственно-временные вариации этого коэффициента определяют деформированное состояние в зонах субдукции.

Во **второй главе** описаны методика моделирования деформаций в зонах субдукции и подходы к решению обратных задач, возникающих при оценке пространственно-временного распределения межплитового сцепления по поверхностным смещениям.



**Рис. 1.** Схема смещений в зоне субдукции.

В рассматриваемой модели скорость  $U_{def}$  смещений в нависающем крыле континентальной плиты связана со скоростью  $U_{lock}$  смещения ее нижнего края сверткой с функцией Грина  $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s)$  вдоль контактной зоны  $S$ :

$$U_{def}(\mathbf{r}) = \iint_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) U_{lock}(\mathbf{r}_s) dS. \quad (1)$$

Доступная для наблюдений на поверхности часть этих модельных смещений  $\mathbf{u}_{model}$  может быть сопоставлена с измеренными смещениями  $\mathbf{u}_{surf}$ , что позволяет решить обратную задачу по определению скорости  $\mathbf{U}_{lock}$  и сопоставить ее со скоростью субдукции  $\mathbf{U}_{subd}$  для оценки межплитового сцепления.

Постановка рассматриваемой обратной задачи предполагает отыскание континуального распределения скорости смещения нижнего края нависающей плиты  $\mathbf{U}_{lock}$  по дискретному набору поверхностных смещений  $\mathbf{u}_{surf}$  путем минимизации невязки модельных смещений  $\mathbf{u}_{model}$  с наблюдаемыми  $\mathbf{u}_{surf}$ . В общем случае данная обратная задача является некорректной и необходима ее регуляризация. Одним из подходов, дающих возможность привести такую задачу к конечной системе уравнений и регуляризовать ее, является дискретизация области определения искомого параметра, адекватная детальности покрытия исходных данных, а также привлечение известных физических ограничений на область возможных решений, а именно, по величине и направлению искомых векторов. Скорость смещения нижнего края нависающей плиты не должна превосходить по величине скорости схождения плит  $\mathbf{U}_{subd}$  и, для фронтальной субдукции, как правило, предполагается совпадающей по направлению со скоростью субдукции. Более общий подход, предполагает возможность допустить небольшое отклонение направления искомых векторов от направления взаимного смещения плит в контактной зоне в процессе субдукции. Такое отклонение должно быть достаточно малым для исследуемых в настоящей работе регионов фронтальной субдукции. В таких случаях в качестве параметра, отражающего межплитовое сцепление, следует принимать проекцию вектора скорости смещения нижнего края нависающей плиты на направление субдукции.

Пространственная дискретизация реализуется путем разбиения субдукционной поверхности на множество непересекающихся прямоугольных элементов с учетом вариаций азимута простирания поверхности и угла падения, соответствующим профилю погружающейся плиты (рис. 2, рис. 5). Выбор прямоугольников в качестве элементов разбиения обусловлен наличием программных пакетов для вычисления свертки функции Грина с вектором смещения по разрыву прямоугольной формы. Размер прямоугольного элемента задавался в соответствии с пространственной разрешающей способностью

измерительной сети спутниковых геодезических наблюдений и выбирался минимально возможным на основе численных тестов, при котором получалось устойчивое решение обратной задачи.

Принимая во внимание аддитивность интеграла свертки (1), модельные поверхностные смещения  $\mathbf{V}$  в каждой точке наблюдения  $\mathbf{r}_i$  можно представить в виде суммы результирующих поверхностных смещений, вызванных смещениями вдоль каждого прямоугольного элемента разбиения контактной зоны:

$$V(\mathbf{r}_i) = \sum_{j=1}^m (k_{j1} M_{ij1} + k_{j2} M_{ij2}), \quad (2)$$

где

$$\left. \begin{aligned} M_{ij1} &= \iint_{S_j} \mathbf{G}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s) \mathbf{e}_{j1} dS \\ M_{ij2} &= \iint_{S_j} \mathbf{G}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s) \mathbf{e}_{j2} dS \end{aligned} \right\}, \mathbf{r}_s \in S_j, \quad (3)$$

$k_{j1}$  и  $k_{j2}$  – компоненты смещений вдоль единичных векторов  $\mathbf{e}_{j1}$  и  $\mathbf{e}_{j2}$ , направленных по простираанию и падению каждого прямоугольного элемента  $S_j$  поверхности  $S$ :

$$S = \bigcup_j S_j, j=1..m, S_p \cap S_q = \emptyset, \text{ при } p \neq q. \quad (4)$$

Тогда решение исходной обратной задачи в регуляризированной постановке сводится к минимизации модифицированной целевой функции, включающей невязку наблюдаемых поверхностных скоростей смещений  $\mathbf{V}_{(obs)}$  с модельными  $\mathbf{V}$ , а также норму искомого решения:

$$F(\mathbf{k}) = \sum_i \left| \sum_j M_{ij} k_j - V_{(obs)i} \right|^2 + \lambda \sum_j |k_j|^2, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – это положительный параметр регуляризации,  $i$  – индекс суммирования по наблюдательным пунктам. Выбор параметра регуляризации  $\lambda$  выполняется из условия статистического согласия между итоговыми невязками и погрешностями исходных измерений, а именно, статистика  $\chi_{red}^2$  найденного решения должна удовлетворять условию:

$$\chi_{red}^2 = \frac{1}{n} \sum_i \frac{\left| \sum_j M_{ij} k_j - V_{(obs)i} \right|^2}{\sigma_i^2} \rightarrow 1, \quad (6)$$

где  $\sigma_i$  – ошибка измерений в  $i$ -ой точке наблюдения,  $n$  – количество пунктов наблюдения.

При этом дополнительные физические ограничения по величине векторов и по величине угла отклонения векторов  $\beta$  имеют вид:

$$\sqrt{k_{j1}^2 + k_{j2}^2} \leq |\mathbf{U}_{subd}|, \quad |k_{j1}| \leq \operatorname{tg}(\beta) \cdot k_{j2}, \quad k_{j2} \geq 0. \quad (7)$$

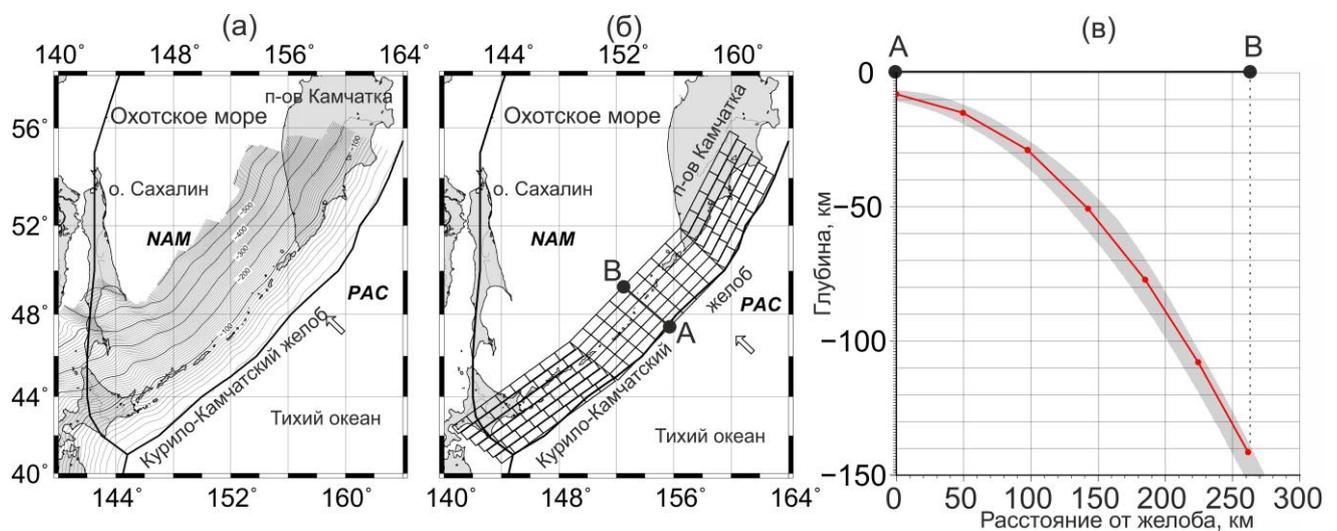
Таким образом, получающаяся обратная задача со всеми дополнительными ограничениями представляет собой задачу нелинейного программирования с нелинейными ограничениями, решение которой достигается с помощью существующих программных пакетов. Одним из таких пакетов является NPSOL. Применение данного пакета предполагает составление пользователем программных модулей, задающих целевую функцию и нелинейные ограничения, а также настройку необходимых параметров процедуры минимизации в управляющем модуле.

Данный подход позволяет моделировать как быстрые деформации вследствие землетрясения, так и медленные межсейсмические деформации земной поверхности, отражающие процесс накопления упругих напряжений.

Одним из наиболее распространенных современных способов наблюдения поверхностных смещений являются методы спутниковой геодезии. Временные ряды спутниковых геодезических измерений содержат компоненты, отражающие процессы различной природы: медленное межсейсмическое накопление напряжений, сейсмические ступенчатые смещения, постсейсмические переходные процессы (рис. 3а, рис. 6). Кроме этого, временные ряды смещений спутниковых геодезических станций содержат инструментальные шумы, обусловленные особенностями самой системы измерений. Для выявления компонент, отражающих именно межплитовое сцепление, исходные временные ряды аппроксимируются регрессионной моделью, которая позволяет достаточно уверенно оценивать практически все перечисленные компоненты. Вычитание всех слагаемых с характерной нелинейной временной зависимостью позволяет получить отфильтрованный временной ряд, вариации которого отражают изменения межплитового сцепления (рис. 3б). 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, в данном исследовании составил один год.

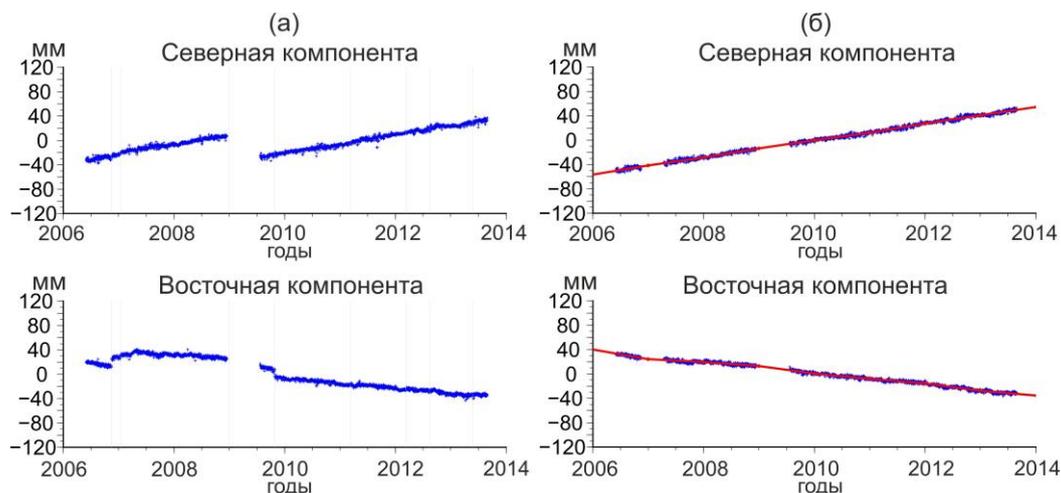
На основе описанной выше методологии в **третьей главе** приведен детальный анализ деформационных процессов в Курило-Камчатской зоне субдукции по данным ГНСС станций Курило-Камчатской региональной сети. За период 2006 – 2008 гг. вдоль Курильской островной дуги были установлены 8 станций ГНСС постоянного наблюдения. Сильнейшие Симуширские землетрясения 15.11.2006 г.  $M_w=8.3$  и 13.01.2007 г.  $M_w=8.1$ , произошедшие в центральной части Курильской дуги, заметно повлияли на развитие деформационных процессов в данном регионе.

Методология построения пространственно-временного распределения деформаций в зонах субдукции, описанная в главе 2, предполагает пространственную дискретизацию, которая отражена на рис. 2. Нижняя граница области дискретизации во избежание необоснованных ограничений выбрана заведомо глубже сейсмогенной зоны, которая для Курило-Камчатского региона по разным оценкам достигает глубины 70–100 км. В результате применения численных тестов на устойчивость искомого распределения размер прямоугольного элемента был выбран 50 км на 100 км.



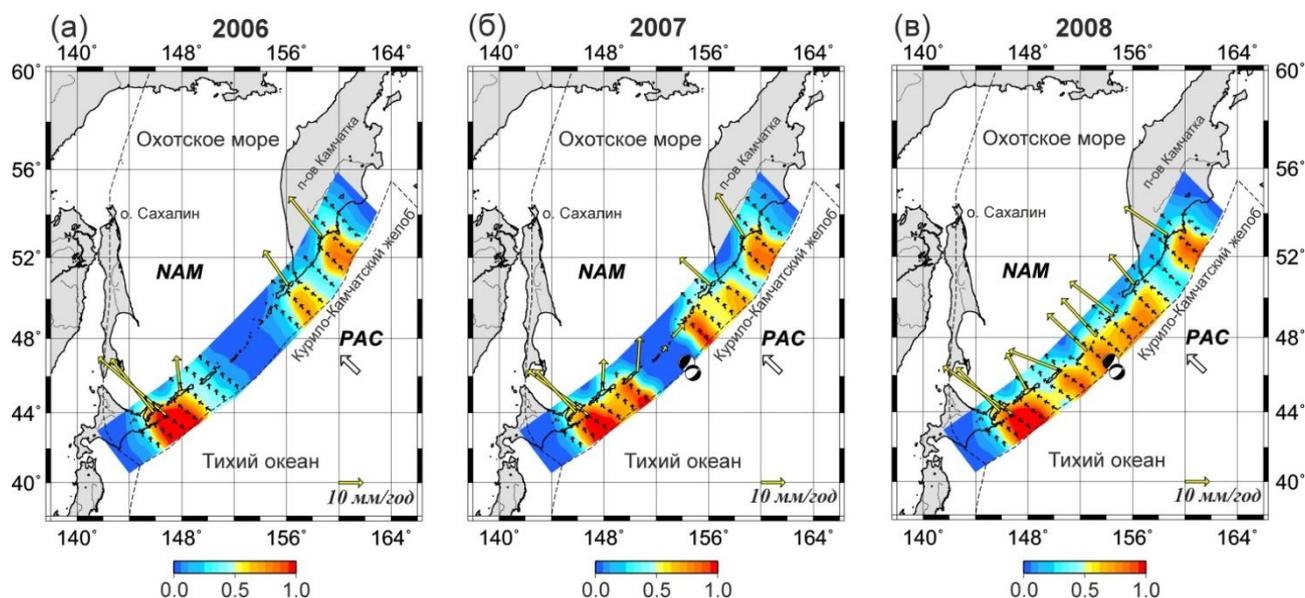
**Рис. 2.** Профиль Курило-Камчатской зоны субдукции: а – профиль межплитовой контактной зоны, б – дискретизация межплитовой контактной зоны; в – вертикальный разрез вдоль АВ, серая полоса – пределы вариации профиля межплитовой контактной зоны центральной части Курил.

Применение регрессионного анализа позволяет во временных рядах положений станций ГНСС выделить составляющие смещения с медленно меняющимся линейным трендом, ассоциируемым с вариациями межплитового сцепления (рис. 3), а кусочно-линейная аппроксимация отфильтрованных рядов позволяет оценить вариации скоростей поверхностных смещений станций ГНСС.



**Рис. 3.** Временные ряды смещений станции ITUR Курильской сети: а – исходный, б – отфильтрованный. Кусочно-линейная аппроксимация показана красной линией.

По полученным вариациям скоростей движения станций оценены пространственно-временные вариации межплитового сцепления Курило-Камчатской зоны субдукции (рис. 4). Линейное расположение станций, обусловленное местоположением островов, на которых они находятся, приводит к необходимости наложения дополнительных условий для регуляризации задачи, а именно, условия монотонного убывания по глубине искомого распределения (рис. 4).



**Рис. 4.** Пространственно-временные вариации межплитового сцепления для Курило-Камчатского региона. Механизмы очагов Симуширских землетрясений.

Исходя из полученных распределений межплитового сцепления выделяются следующие закономерности:

1. После сильнейших парных землетрясений, произошедших в районе средних Курил в 2006–2007 гг., механизм первого из которых согласуется с пологим субдукционным надвигом, наблюдается отсутствие межплитового

сцепления в очаговой зоне первого события (рис. 4б). Т.е. в результате этих землетрясений произошла полная реализация накопленного ранее деформационного потенциала данной части сейсмофокальной зоны, что позволяет принять указанные сейсмические события за начало отсчета для оценки последующего накопления сейсмогенного потенциала в межплитовой контактной зоне.

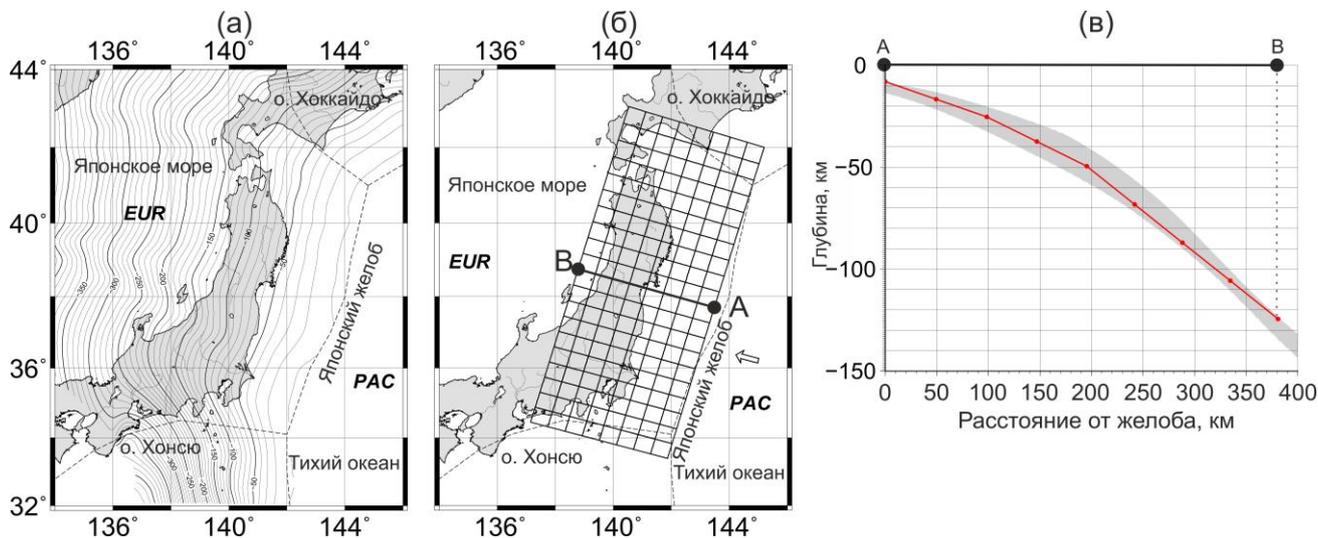
2. Со временем сцепление в очаговой зоне проявляет тенденцию к восстановлению, что подтверждает начало нового цикла накопления упругих напряжений (рис. 4).

3. В найденном распределении выделяются юго-западный и северо-восточный фланги Курильской гряды, которые характеризуются стационарным характером распределения межплитового сцепления слабо меняющимся во времени. Сравнение с кратковременными предсейсмическими данными (рис. 4а) позволяет предположить, что межплитовое скольжение в Курильской зоне субдукции происходило в таком же режиме и перед Симуширскими землетрясениями 2006–2007 гг.

Вопрос о том, насколько сопоставимо состояние зоны субдукции после сильнейшего межплитового землетрясения и перед ним, требует наличия предсейсмических измерений. В частности, принципиально важен вопрос: существует ли предсейсмическая стадия сейсмического цикла, регистрируемая каким-либо видом измерений.

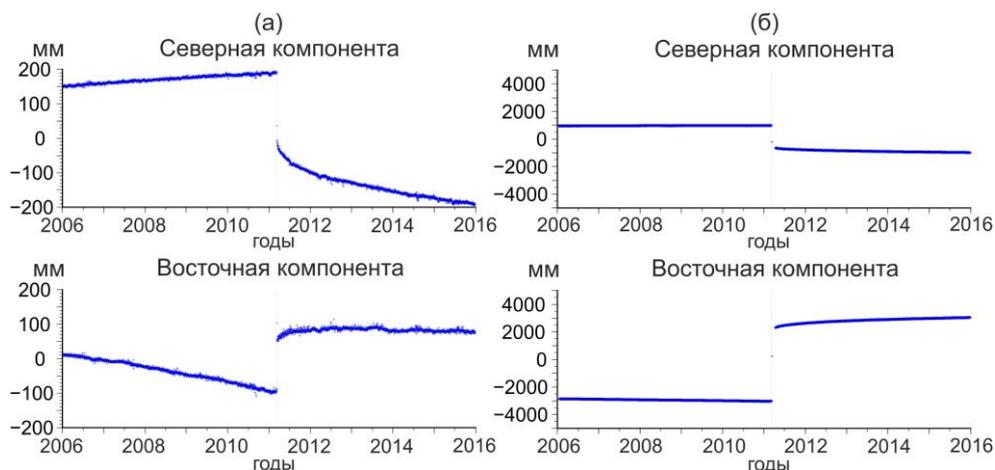
Для исследования данного вопроса и проверки применимости предложенной методики в других регионах в **четвертой главе** рассматриваются пространственно-временные вариации деформационных процессов в районе Японской зоны субдукции. В данном районе развернута густая сеть станций спутниковых геодезических измерений, непрерывно работавшая как до, так и после катастрофического землетрясения Тохоку 11.03.2011 г.  $M_w=9.1$ , которое привело к изменению напряженно-деформированного состояния данного региона.

Дискретизация субдукционной поверхности выполнена с учетом вертикального профиля сейсмофокальной зоны (рис. 5). Также как и для Курило-Камчатского региона, нижняя граница области дискретизации выбрана заведомо глубже нижней границы сейсмогенной зоны, значение которой для Японского региона по разным оценкам составляет 50–80 км. Размер прямоугольного элемента по результатам численных тестов на устойчивость искомого распределения был выбран 50 км на 50 км.



**Рис. 5.** Профиль Японской зоны субдукции: а – профиль межплитовой контактной зоны, б – дискретизация межплитовой контактной зоны; в – вертикальный разрез вдоль АВ, серая полоса – пределы вариации профиля межплитовой контактной зоны центральной части Японской зоны субдукции.

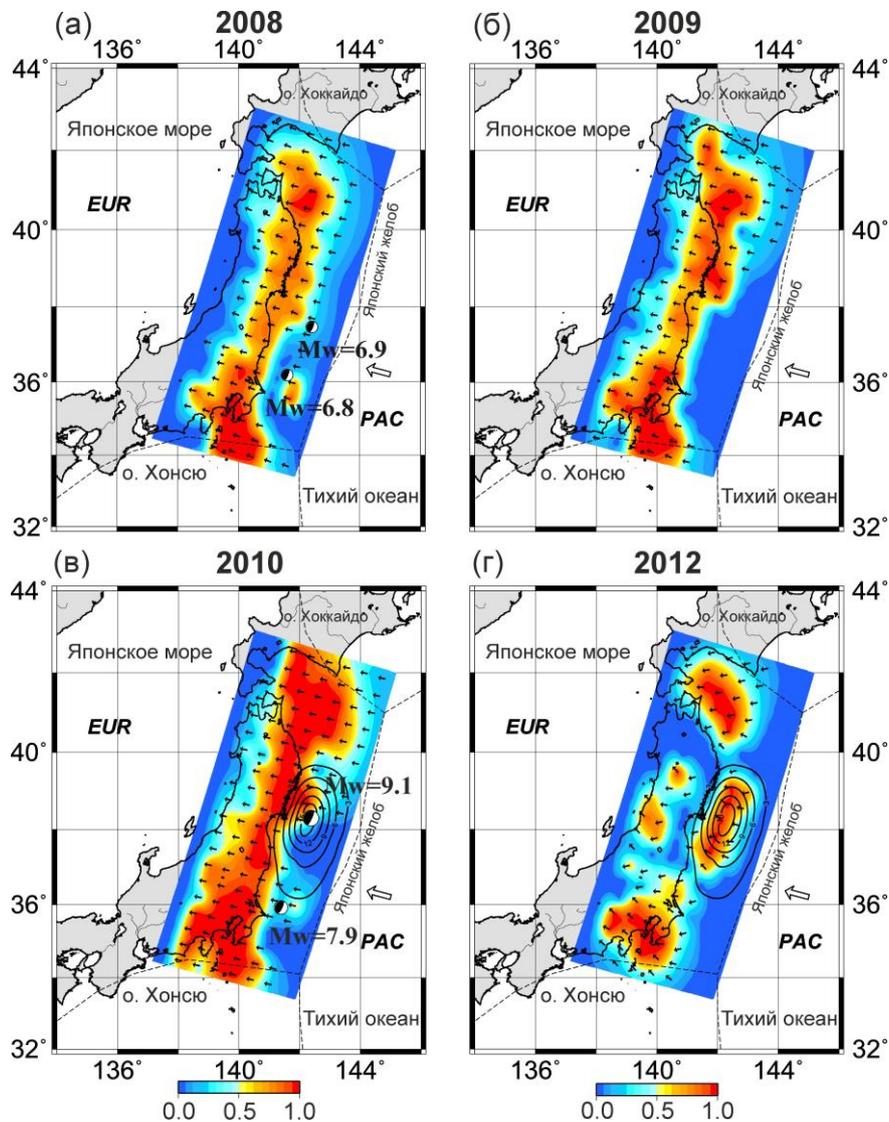
Длительный межсейсмический период проявляется во временных рядах смещения станций ГНСС доминированием линейной зависимости по сравнению с другими вариациями (рис. 6). При этом длиннопериодный линейный тренд может меняться вследствие перераспределения деформационных напряжений. Сейсмические события отражаются во временных рядах в виде ступенчатых смещений. Землетрясение Тохоку 11.03.2011 г.  $M_w=9.1$  отразилось во временных рядах станций одномоментными смещениями от 5 метров на станциях, расположенных вблизи эпицентра, до нескольких сантиметров на большом удалении (рис. 6). После землетрясения Тохоку во всех временных рядах станций, расположенных на о. Хонсю наблюдаются заметные постсейсмические смещения, затухающие с различной интенсивностью.



**Рис. 6.** Временные ряды смещений станций Японской сети за период 2006 – 2016 гг.: а – станция ГНСС 0022; б – станция ГНСС 0550.

Вариации скоростей поверхностных смещений станций ГНСС оценивались с помощью регрессионного анализа исходных временных рядов. По полученным вариациям скоростей движения станций построено пространственно-временное распределение межплитового сцепления Японской зоны субдукции (рис. 7), которое позволяет сделать следующие выводы:

1. Пространственное распределение межплитового сцепления не согласуется с теми представлениями, согласно которым сейсмофокальная зона постоянно находится в состоянии полного сцепления по всей глубине, что нарушается исключительно сейсморазрывами во время межплитовых субдукционных землетрясений. Вдоль контактной зоны существуют как области полного сцепления, так и области свободного проскальзывания.



**Рис. 7.** Пространственно-временные вариации межплитового сцепления для Японской зоны субдукции. Механизмы очагов землетрясений: 07.05.2008 г.  $M_w=6.8$  (а), 19.07.2008 г.  $M_w=6.9$  (а), Тохоку  $M_w=9.1$  (в) и его сильнейшего афтершока  $M_w=7.9$  (в). Изолинии смещений в очаге землетрясения Тохоку (в, г).

2. В 2007–2008 гг. в области к востоку от Тихоокеанского побережья о. Хонсю (в районе  $142^{\circ}$  в.д.,  $36^{\circ}$ – $38^{\circ}$  с.ш.) формируются локальные неоднородности пространственного распределения межплитового сцепления, где в 2008 году происходит серия межплитовых землетрясений (рис. 7а), которые разгрузили данную часть сейсмофокальной зоны. Следствием этого стал срыв одной из областей повышенного сцепления (в районе  $142^{\circ}$  в.д.,  $36^{\circ}$  с.ш.) и возникновение в смежной области (в районе  $142^{\circ}$  в.д.,  $38^{\circ}$  с.ш.) резкого латерального градиента межплитового сцепления в направлении простирания межплитовой контактной зоны, что означает начало смещения ранее сцепленной части нависающей плиты в сторону океана в режиме свободного скольжения, что совпадает с направлением косейсмической подвижки будущего землетрясения (рис. 7б). В 2010 г. на эту локальную особенность (в районе  $142^{\circ}$  в.д.,  $38^{\circ}$  с.ш.) накладывается вовлечение более обширной, в частности, более глубокой части контактной зоны в обратное (субдукционное) смещение (рис. 7в). В 2011 г. наложение этих двух факторов, предположительно, создало предпосылки для превышения предела прочности сформировавшейся локальной особенности сцепления и, как следствие, к срыву в виде землетрясения (рис. 7в).

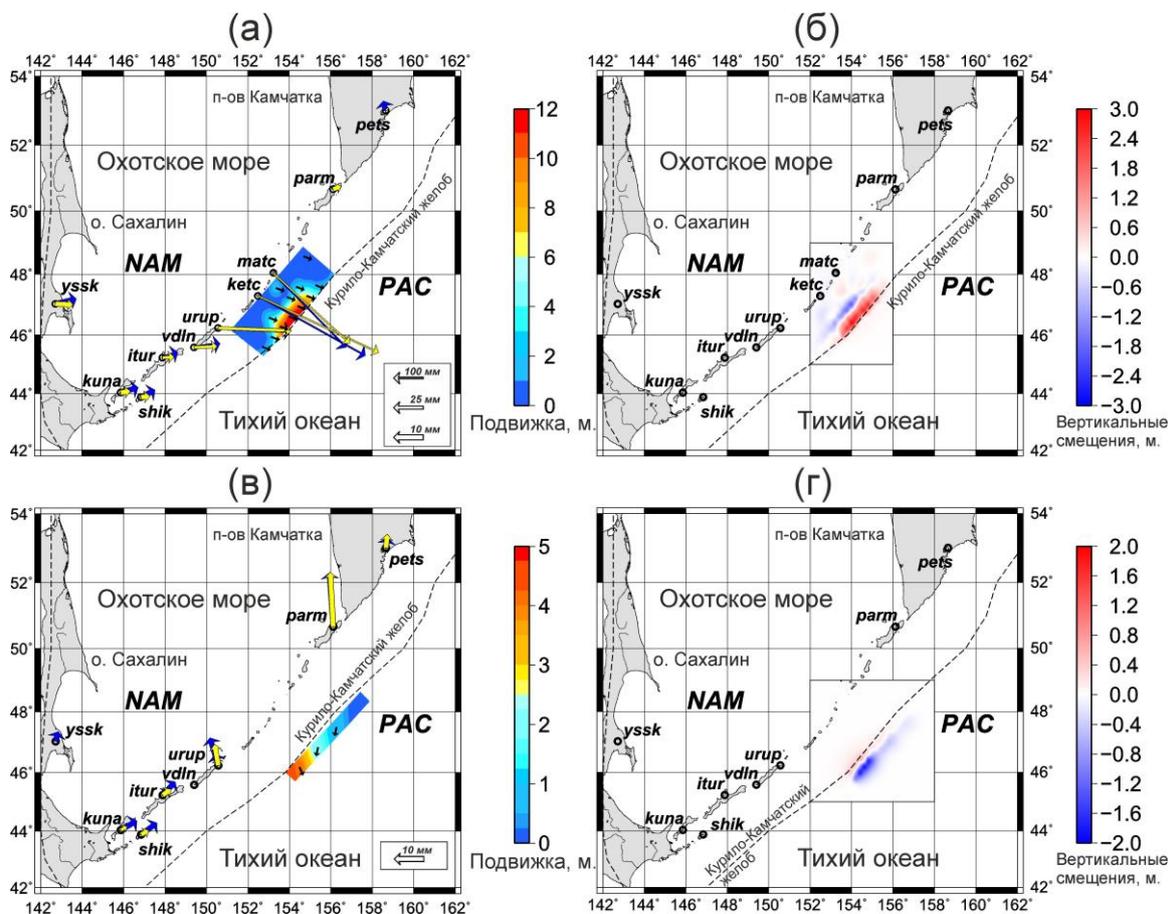
3. Очаговая зона землетрясения Тохоку совпала с областью максимального градиента межплитового сцепления, т.е. оказалась на границе полного сцепления и свободного проскальзывания ранее сцепленной зоны. Через 30 минут после основного толчка произошел сильнейший афтершок  $M_w=7.9$  в ранее сформировавшейся смежной области локальной неоднородности.

4. После сильнейшего субдукционного землетрясения Тохоку наблюдается разгрузка накопленных напряжений, которая проявляется как значительное ослабление, вплоть до полного исчезновения межплитового сцепления в значительной части сейсмофокальной зоны, примыкающей к очагу данного события (рис. 7г). Со временем сцепление в Японской сейсмофокальной зоне проявляет тенденцию к восстановлению, что подтверждает начало нового цикла накопления упругих напряжений. По сравнению с Курило-Камчатской островной дугой время восстановления межплитового сцепления для Японии значительно дольше: 2–2.5 года.

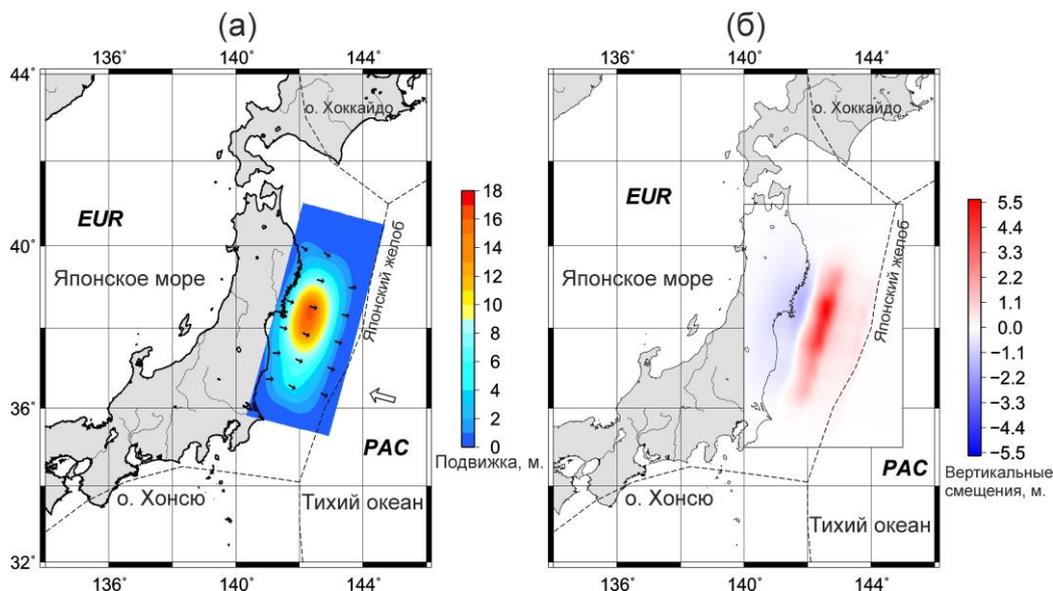
В пятой главе приведен анализ косейсмических деформаций в исследуемых регионах. Значимость изучения предсейсмических смещений в качестве индикатора подготовки сильнейших землетрясений требует соотнесения

особенностей предсейсмического деформирования в межплитовой контактной зоне с локализацией сеймотектонических смещений в очаге последующего землетрясения. Кроме того, если ожидаемый очаг находится в мелкофокусной подводной части контактной зоны между островной дугой и глубоководным субдукционным желобом, то такой очаг может генерировать заметные вертикальные подвижки морского дна, вызывающие волны цунами. Чтобы оценить насколько обоснованы деформационные признаки подготовки сильнейшего землетрясения и его цунамигенный потенциал, выполнено моделирование косейсмических деформаций в очагах рассматриваемых землетрясений и соответствующие вертикальные подвижки морского дна.

Данные ГНСС о косейсмических смещениях земной поверхности позволяют оценить распределение деформаций в очагах сильных землетрясений, что, в свою очередь, дает возможность смоделировать поле вертикальных смещений дна океана в случае подводных землетрясений. Такое построение было выполнено для двух Симуширских землетрясений и землетрясения Тохоку (рис. 8, рис. 9).



**Рис. 8.** Распределение подвижки в очагах Симуширских землетрясений: а – 15.11.2006г.  $M_w=8.3$ , в – 13.01.2007г.  $M_w=8.1$ . Поле вертикальных поднятий дна океана: б – 15.11.2006г., г – 13.01.2007г. Синие стрелки – измеренные смещения станций ГНСС наблюдений, желтые стрелки – модельные смещения.



**Рис. 9.** Распределение подвижки в очаге землетрясения Тохоку (а). Поле вертикальных поднятий дна океана в эпицентре очага землетрясения Тохоку (б).

Для землетрясения 15.11.2006 г.  $M_W=8.3$  максимальное поднятие составило около 3 м, а опускание около 1 м (рис. 8б). При землетрясении 13.01.2007 г.  $M_W=8.1$  поднятие дна было незначительное и составило 0.4 м, а опускание составило более 2 м, что объясняется сбросовым типом данного землетрясения (рис. 8г). Вертикальное поднятие дна океана во время землетрясения Тохоку в пике превышало 5 метров, значительная по площади часть поверхность дна в эпицентральной области поднялась выше 2 метров (рис. 9б). Каждое из указанных событий породило трансокеанское цунами.

Сравнивая анализируемые сейсмические события, надо отметить, что в среднем поднятие дна для первого Симуширского землетрясения и землетрясения Тохоку сопоставимы по величине. В то же время, площадь, охваченная поднятием при землетрясении Тохоку, оказалась гораздо больше, что и отразилось в масштабах его последствий. Во многих пунктах побережья о. Хонсю высота цунами превышала 20 м при максимальном значении 40 м.

Построенные распределения вертикальных смещений в эпицентрах землетрясений являются начальными условиями при моделировании распространения цунами, а благодаря современным каналам связи и вычислительной технике могут быть получены практически в режиме реального времени, сразу по мере прихода волны сейсмических смещений на станции ГНСС. Хорошо заметный сигнал приходит со скоростью поверхностных волн, которая на порядок выше скорости волны цунами. Это обуславливает возможность практического применения технологии ГНСС для раннего оповещения о цунами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спутниковые геодезические методы дают возможность регистрировать как быстрые, так и медленные смещения земной поверхности, что позволяет изучать деформации в зонах субдукции на разных стадиях сейсмического цикла.

В настоящей работе предложен подход для моделирования деформаций в зонах субдукции по данным о смещениях земной поверхности, регистрируемых методами спутниковой геодезии. Разработана методология для выявления пространственных и временных вариаций деформаций в зонах субдукции. Выявление пространственных вариаций деформаций в межплитовой контактной зоне достигается путем ее дискретизации с учетом глубинного профиля и линеаризации соответствующей обратной задачи. В свою очередь, выявление временных вариаций выполнено на основе применения регрессионного анализа к исходным временным рядам измерений, которые содержат шумы различных происхождений и отражают процессы различной природы. Исследована устойчивость решения обратной задачи моделирования межплитовых деформаций в зонах субдукции на основе применения численных тестов.

Предложенный подход был применен для изучения деформационных процессов в Курило-Камчатской и Японской зонах субдукции. Полученные пространственно-временные вариации межплитового сцепления и соотнесение их с развитием сейсмического процесса позволили выявить особенности деформаций в указанных регионах на разных стадиях сейсмического цикла.

Изучение медленных межсейсмических деформаций и их вариаций позволяет выделять области максимального накопления напряжений, быстрая разгрузка которых может привести к возникновению сильнейших землетрясений. Локализация мест наиболее вероятного возникновения землетрясений позволяет выявить цунамигенный характер возможного события. В результате проведенных исследований выявлены практические возможности как предварительного, так и оперативного геодинамического мониторинга подготовки и реализации сильнейших субдукционных сейсмических событий, в частности, их цунамигенного потенциала.

В целом, по итогам исследований, представленных в настоящей работе, можно сделать следующие основные **выводы**:

1. Проанализирована модель развития деформационных процессов в зонах субдукции на разных стадиях сейсмического цикла. Рассмотренная модель позволяет в достаточной мере адекватно связать наблюдаемые на земной поверхности смещения с проявлением глубинных тектонических процессов в соответствии с существующими представлениями о геодинамике субдукционных регионов.

2. В рамках рассмотренной модели развития деформационных процессов в зонах субдукции исследованы вопросы пространственной неравномерности межплитового сцепления в таких зонах. На примере изученных в настоящей работе регионов показана значимость учета вариаций сцепления в межплитовой контактной зоне при моделировании тектонических процессов в субдукционных регионах.

3. Анализ временных зависимостей смещений земной поверхности в рассмотренных субдукционных регионах показал возможность выделения временных вариаций поверхностных смещений, связанных с проявлением временных вариаций сцепления в межплитовой контактной зоне на различных стадиях сейсмического цикла, и, в частности, показана возможность инструментального наблюдения стадии подготовки сильнейших землетрясений.

Методы спутниковой геодезии представляют собой перспективное и активно развивающееся направление изучения деформаций земной поверхности. Развитие систем наблюдения деформаций земной поверхности в сейсмически активных регионах позволяет усовершенствовать модели глубинных тектонических процессов и изучить закономерности их развития на разных стадиях сейсмического цикла, и в частности, на стадии подготовки сильнейших межплитовых землетрясений. Это, в свою очередь, позволит усовершенствовать систему мониторинга глубинных тектонических процессов в целом.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., Болдина С.В., Сдельникова И.А. О возможности оценок косейсмической деформации по данным уровнемерных наблюдений в скважине // Физика Земли. – 2010. – № 1. – С. 51–61.
2. Сдельникова И.А., Стеблов Г.М. Мониторинг цунамигенных землетрясений методами спутниковой геодезии // Геофизические исследования. – 2016. – Т. 17. – №1. – С. 46–55.

### Публикации в прочих изданиях:

3. Сдельникова И.А. Сопоставление результатов моделирования косейсмической деформации и данных уровнемерных наблюдений в скважине (на примере Камчатского региона) // Десятая уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник научных материалов. – Пермь: ИГф УрО РАН, 2009. – С. 186–191.
4. Копылова Г.Н., Таранова Л.Н., Сдельникова И.А. Оценка гидрогеологических последствий сильных землетрясений (на примере сейсмоактивных районов России) // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Сборник трудов второй региональной научно-технической конференции. – П.-Камчатский: ГС РАН Камчатский фил., 2010. – С. 126–130.
5. Сдельникова И.А. Пространственно-временные вариации деформационных процессов в районе Курило-Камчатской зоны субдукции // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы докладов. – М.:ИФЗ РАН, 2016. – С. 60.
6. Steblov G.M., Sdelnikova I.A. Seismology and satellite geodesy: multisystem approach to the earthquake monitoring // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. – М.: ГЦ РАН, 2016.–Т.4.–№2.–С.111.
7. Сдельникова И.А., Стеблов Г.М. Пространственно-временные вариации деформационных процессов в районе Курило-Камчатской зоны субдукции // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о земле. Материалы четвертой тектонофизической конференции. – М.: ИФЗ РАН, 2016. – С. 252–255.
8. Сдельникова И.А., Стеблов Г.М. Напряженно-деформированное состояние Японской зоны субдукции по данным спутниковой геодезии // Материалы XII Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 315-319.

Подписано в печать 05.07.2018 г.  
Формат 64×84/16. Объем 1,0 усл. печ. л.  
Тираж 100 шт. Заказ № 1804

Отпечатано в типографии ООО «Альпринт»  
249030, Калужская обл., г. Обнинск, пр. Маркса, д. 14  
Тел./факс: (484) 394-47-77. E-mail: 40print@gmail.com