



MODELLING OF POSTSEISMIC PROCESSES IN SUBDUCTION ZONES

I. S. Vladimirova

Geophysical Survey, RAS, Obninsk, Russia

Abstract: Large intraplate subduction earthquakes are generally accompanied by prolonged and intense postseismic anomalies. In the present work, viscoelastic relaxation in the upper mantle and the asthenosphere is considered as a main mechanism responsible for the occurrence of such postseismic effects. The study of transient processes is performed on the basis of data on postseismic processes accompanying the first Simushir earthquake on 15 November 2006 and Maule earthquake on 27 February 2010.

The methodology of modelling a viscoelastic relaxation process after a large intraplate subduction earthquake is presented. A priori parameters of the selected model describing observed postseismic effects are adjusted by minimizing deviations between modeled surface displacements and actual surface displacements recorded by geodetic methods through solving corresponding inverse problems.

The presented methodology yielded estimations of Maxwell's viscosity of the asthenosphere of the central Kuril Arc and also of the central Chile. Besides, postseismic slip distribution patterns were obtained for the focus of the Simushir earthquake of 15 November 2006 ($M_w=8.3$) (Figure 3), and distribution patterns of seismic and postseismic slip were determined for the focus of the Maule earthquake of 27 February 2010 ($M_w=8.8$) (Figure 6). These estimations and patterns can provide for prediction of the intensity of viscoelastic stress attenuation in the asthenosphere; anomalous values should be taken into account as adjustment factors when analyzing inter-seismic deformation in order to ensure correct estimation of the accumulated elastic seismogenic potential.

Key words: viscosity, asthenosphere, postseismic processes, viscoelastic relaxation.

Recommended by V.A. San'kov 24 April 2012

Citation: Vladimirova I.S., 2012. Modelling of postseismic processes in subduction regions. *Geodynamics & Tectonophysics* 3 (2), 167–178. doi:10.5800/GT-2012-3-2-0068.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СУБДУКЦИОННЫХ ЗОНАХ

И. С. Владимирова

Геофизическая служба РАН, Обнинск, Россия

Аннотация: Крупные межплитовые субдукционные землетрясения, как правило, сопровождаются длительными и интенсивными постсейсмическими аномалиями. В настоящей работе в качестве основного механизма, ответственного за возникновение подобных постсейсмических эффектов, рассматривается процесс вязкоупругой релаксации в верхней мантии и астеносфере. Исследование переходных процессов проводится на примере постсейсмических явлений, сопровождающих первое Симуширское землетрясение 15 ноября 2006 г., а также землетрясение Мауле 27 февраля 2010 г.

Описана методология моделирования процесса вязкоупругой релаксации после крупных межплитовых субдукционных землетрясений. Уточнение априорных параметров выбранной модели, описывающей наблюдаемые пост-

сейсмические эффекты, осуществляется за счет уменьшения невязки между моделируемыми и наблюдаемыми геодезическими методами смещениями земной поверхности при решении соответствующей обратной задачи.

В соответствии с представленной методологией получены оценки Максвелловской вязкости астеносферы в срединной части Курильской островной дуги, а также в регионе Центрального Чили. Кроме того, получены распределения постсейсмической подвижки в очаге Симуширского землетрясения, $M_w=8.3$ (рис. 3), а также распределения сейсмической и постсейсмической подвижек в очаге землетрясения Мауле, $M_w=8.8$ (рис. 6). Результат таких оценок и построений позволяет прогнозировать интенсивность затухания вязкоупругих напряжений в астеносфере. Учет соответствующих аномалий в качестве поправок необходим при анализе межсейсмических деформаций для корректного оценивания накапливающегося упругого сейсмогенного потенциала.

Ключевые слова: вязкость, астеносфера, постсейсмические процессы, вязкоупругая релаксация.

1. ВВЕДЕНИЕ

Зоны субдукции являются одними из наиболее тектонически и сейсмически активных регионов Земли, характеризующихся активным взаимодействием литосферных плит с погружением океанической плиты под континентальную. В субдукционных зонах реализуется до 80–90 % общего сейсмического потенциала Земли, здесь происходят как наиболее крупные – с магнитудой более 8, так и наиболее глубокие по расположению очага – до 600 км – землетрясения. Высокая сейсмическая активность зон субдукции делает особенно актуальной задачу оценки сейсмической опасности этих регионов. Решение этой задачи, в свою очередь, связано как с оценкой потенциала накопленных упругих (или вязкоупругих) деформаций, так и с изучением механизма сброса накопленных напряжений в очаговой зоне, так как постсейсмические процессы после крупных событий могут быть достаточно интенсивными и вносить существенный вклад в реализовавшийся сейсмический момент. Кроме того, для правильной оценки накапливающегося сейсмогенного потенциала необходимо прогнозирование времени затухания постсейсмических эффектов после крупных землетрясений, так как интенсивные постсейсмические процессы могут препятствовать переходу сейсмогенной зоны в стационарное «межсейсмическое» состояние, сопровождающееся накоплением деформационного потенциала. Таким образом, изучение постсейсмических процессов является важной частью комплексного подхода к изучению напряженно-деформированного состояния литосферы в районах высокой тектонической активности.

2. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ

Развитие методов космической геодезии, в том числе технологии GPS, сделало возможным получение высокоточных расстояний (1–2 мм) между точками земной поверхности. Это обусловило применимость

данных GPS-наблюдений для исследования деформаций земной поверхности. Создание международной земной системы относимости (ITRF) на основе глобального полигона опорных станций, распределенных по земной поверхности, позволило перейти от исследования относительных смещений (деформаций) к исследованию абсолютных смещений точек земной поверхности (движений). Важным преимуществом использования технологии GPS является то, что непрерывное ежесуточное высокоточное измерение координат и скоростей движения станций дает возможность прямого измерения как смещений вследствие сейсмических событий, так и последующего перемещения пунктов сети вследствие действия возможных постсейсмических процессов. В последние два десятилетия развитие сетей постоянных станций GPS-наблюдений позволило организовать непрерывный мониторинг деформаций земной поверхности в тектонически активных регионах, в частности в зонах субдукции. В общем случае, движение станции в деформационном поясе вблизи границ литосферных плит складывается из движения станции как части жесткого тектонического блока и деформационной составляющей. Таким образом, для исследования деформаций земной поверхности, из общего смещения станции необходимо вычесть смоделированное смещение станции как точки, принадлежащей литосферной плите. Литосферная плита, в первом приближении, представляется твердым телом, вращающимся вокруг полюса Эйлера, а значит, согласно теореме Эйлера, скорость любой точки этой плиты V_i может быть представлена в виде:

$$V_i = \Omega \times R_i, \quad (1)$$

где Ω – вектор Эйлера для данной плиты, R_i – радиус-вектор, проведенный из полюса Эйлера до рассматриваемой точки. В настоящей работе для получения модельных скоростей станций использовались оценки векторов Эйлера для основных литосферных плит, полученные в работе [Kogan, Steblou, 2008].

Для исследования движения станции, вызванного

постсейсмическими процессами, необходимо из полученного смещения станции относительно литосферной плиты вычлест стационарную деформационную компоненту, обусловленную упругим деформированием пограничных областей взаимодействующих литосферных плит.

Моделирование стационарной деформационной компоненты осуществляется индивидуально для каждой станции, вследствие значительных пространственных вариаций, определяющихся геологическим и тектоническим строением исследуемого региона.

3. ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Сейсмический цикл, в общем случае, включает в себя три основные стадии: 1) стадию накопления напряжения, вызванного упругими деформациями; 2) стадию высвобождения накопленного упругого потенциала в момент сейсмического события; 3) стадию действия постсейсмических процессов, в результате которых происходит возврат сейсмогенной зоны в окрестности очага произошедшего сейсмического события к стадии накопления нового напряжения. Непрерывный мониторинг деформационных процессов во многих сейсмоактивных регионах показывает, что постсейсмические движения, сопровождающие сильные землетрясения, существенно различаются по продолжительности и площади простираения и могут достигать значительной интенсивности, сравнимой с самим землетрясением по величине выделившегося скалярного момента.

Для объяснения наблюдаемых постсейсмических эффектов рядом авторов были предложены различные механизмы, такие как упругое фрикционное развитие трещины [Marone et al., 1991; Burgmann et al., 2001] и вязкоупругая релаксация в мантии и астеносфере [Pollitz, 1997, 2003; Boschi et al., 2000]. Помимо этого, к числу основных механизмов, обуславливающих постсейсмические движения, относят также выравнивание порового давления во вмещающих сейсмический разрыв флюидонасыщенных породах. Вопрос о том, какой из механизмов реализуется после каждого конкретного сейсмического события, остается до сих пор неразрешенным. Наиболее вероятным представляется сочетание всех указанных процессов, при которых преобладание того или иного из них меняется со временем и зависит от расстояния до очага землетрясения.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Крупные межплитовые субдукционные землетрясения, как правило, сопровождаются длительными и интенсивными постсейсмическими аномалиями. В настоящей работе в качестве основного механизма, от-

ветственного за возникновение подобных постсейсмических эффектов, рассматривается процесс вязкоупругой релаксации в верхней мантии и астеносфере. Это возможно благодаря рассмотрению исходных геодезических данных для станций, достаточно удаленных от очага землетрясения (более 100 км). Последнее позволяет не учитывать смещения от быстро затухающего с расстоянием эффекта выравнивания порового давления во флюидонасыщенных породах. Рассмотрение временного интервала постсейсмических смещений, начинающегося через полгода после сейсмического события, в свою очередь, дает основание не учитывать эффект от быстро затухающего со временем процесса упругого фрикционного развития трещины.

Моделирование процесса вязкоупругой релаксации производится в предположении о слоистом строении Земли, в котором два верхних слоя представлены абсолютно упругой земной корой толщиной 62 км и подстилающей вязкоупругой астеносферой толщиной 158 км. Плотность верхнего упругого слоя составляет 2.8 г/см^3 , модуль сжатия – $\kappa_1 = 5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$. Реология астеносферы представлена средой Бюргера, включающей в себя элемент Максвелла, последовательно соединенный с элементом Кельвина. При этом элемент Максвелла характеризуется модулем сдвига устойчивого состояния $\mu_1 = 70 \text{ ГПа}$, а априорное значение Максвелловской вязкости составляет $\eta_1 = 10^{19} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Параметры, характеризующие тело Кельвина: Кельвиновская вязкость $\eta_2 = 10^{17} \text{ Па}\cdot\text{с}$ и переходный модуль сдвига $\mu_2 = 35 \text{ ГПа}$. Ниже слоя астеносферы находится слой вязкоупругой верхней мантии с реологией, представленной средой Максвелла с вязкостью $\eta_1 = 10^{20} \text{ Па}\cdot\text{с}$ [Pollitz et al., 2006; Panet et al., 2010].

Уточнение априорных параметров выбранной модели, описывающей наблюдаемые постсейсмические эффекты, осуществляется за счет уменьшения невязки между моделируемыми и наблюдаемыми геодезическими методами смещениями земной поверхности при решении соответствующей обратной задачи. В наиболее общем виде поле кумулятивных вязкоупругих постсейсмических смещений можно представить в виде свертки:

$$u(\bar{r}, t) = \iint_S G(\bar{r}, \bar{r}_S, t, t_S) U(\bar{r}_S) dS, \quad (2)$$

где $G(\bar{r}, \bar{r}_S, t, t_S)$ – функции отклика среды в точке \bar{r} в момент времени t на точечную дислокацию в точке \bar{r}_S в момент времени t_S , $U(\bar{r}_S)$ – вектор дислокации, распределенный по поверхности S . Один из методов построения функций отклика $G(\bar{r}, \bar{r}_S, t, t_S)$ описан в работе [Pollitz, 1997], в которой для сферически симметричной слоистой вязкоупругой модели предложено разложение в ряд по сферическим функциям и приведены их соотношения для источника дислокации, рас-

смагриваемого в виде равномерной подвижки по разрыву прямоугольной формы. Используя методику и соответствующие программные коды VISCO1D [Politz, 1997] и учитывая линейность оператора свертки в (2), для произвольно распределенной неоднородной подвижки $U(\vec{r}_S)$ по произвольной поверхности искомого кумулятивное смещение $u(\vec{r}, t)$ можно аппроксимировать конечной суммой смещений, вызванных набором однородных подвижек по конечному набору прямоугольных элементов, составляющих исходную произвольную поверхность. В целом, для вычисления свертки (2) необходимо задать модель среды и распределение подвижки в очаге. В настоящей работе использовалась модель сферической слоистой Земли с упругой литосферой и с вязкоупругой астеносферой в виде среды Бюргера, включающей в себя как вязкость по Максвеллу, так и вязкость по Кельвину. Подобная реология астеносферы позволяет моделировать и кратковременные (продолжительностью до шести месяцев после события), и длиннопериодные (годы или десятилетия после события) вязкие эффекты.

Для получения распределения подвижки в очаге производится приближение прямоугольными конечными элементами плоскости разрыва, очерченной облаком афтершоков, с учетом профиля субдукционного интерфейса, найденного по данным каталогов сейсмических событий.

5. ПРЯМАЯ ОЦЕНКА ВЯЗКОСТИ АСТЕНОСФЕРЫ

Одним из наиболее трудноопределяемых реологических параметров Земли является вязкость астеносферы. Так как эта величина входит в число определяющих функцию Грина в (2), задача оценки Максвелловской вязкости астеносферы формулируется следующим образом:

$$\min_{\eta_1} \sum_j \sum_i \left| \iint_S G(\eta_1, \vec{r}_j, \vec{r}_S, t_i, t_S) U(\vec{r}_S) dS - u_{obs}(\vec{r}_j, t_i) \right|^2, \quad (3)$$

где минимизация среднеквадратической невязки по параметру η_1 осуществляется по временному ряду измерений $u_{obs}(\vec{r}_j, t_i)$ в момент времени t_i по всем станциям с координатами r_j . С использованием описанной выше методологии вычисления свертки (2) через конечные суммы, задача (3) решается с помощью существующих пакетов, реализующих алгоритмы нелинейного программирования.

Вышеописанная методология нахождения распределенной подвижки в очаге и оценки вязкости астеносферы реализована автором в виде комплекса подпрограмм, который позволяет выполнить все этапы получения решения, начиная от обработки исходных дан-

ных геодезических измерений и заканчивая графическим представлением полученных результатов.

6. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Симуширское землетрясение 2006 г. Курило-Камчатская островная дуга является одним из самых сейсмически активных регионов на Земле. Это связано с высокой скоростью пододвигания Тихоокеанской плиты под Североамериканскую, величина этой скорости составляет 8 см/год. Особый интерес представляет срединная часть Курильской дуги, в которой на протяжении почти ста лет, с 1915 г., наблюдалось сейсмическое затишье. Оно было прервано двумя мощными землетрясениями 2006 и 2007 гг. с магнитудами $M_w=8.3$ и $M_w=8.1$ соответственно (по данным СМТ).

До недавнего времени этот регион практически не был исследован современными методами космической геодезии. Первые GPS-станции периодических наблюдений были установлены здесь в 2005 г., а уже с середины 2006 г. вдоль всей Курильской островной дуги – от Японии до Камчатки – была развернута региональная геодинимическая сеть, в настоящее время насчитывающая восемь станций постоянных и ряд пунктов периодических наблюдений.

На полученных временных рядах станций Курильской сети после землетрясений 2006–2007 гг. были зафиксированы скачки смещений, величины которых составили от нескольких миллиметров до полуметра. (рис. 1). Они дали возможность количественно оценить смещения станций в результате этих сейсмических событий. Полученные величины позволили решить задачу нахождения пространственно распределенной подвижки в очагах землетрясений и уточнить их геометрию [Steblov et al., 2008, 2010].

Продолжительность периода GPS-наблюдений в исследуемом регионе к настоящему времени составляет уже более 3.5 лет после события 2006 г., что позволяет оценить скорости смещения станций Курильской сети в постсейсмический период. Для изучения деформационной составляющей в скоростях станций сети был произведен анализ остаточных скоростей этих пунктов относительно Североамериканской плиты. Для ряда пунктов сети на островах Кунашир (KUNA), Шикотан (SHIK), Итуруп (ITUR) и Парамушир (PARM), расположенных на удалении от сейсмического очага 2006 г., постсейсмические скорости совпали по направлению со скоростями, оцененными для этих же пунктов в межсейсмический период. В то же время векторы постсейсмических скоростей в пунктах, расположенных вблизи очага на островах Кетой (KETC), Матуа (MATC) и Харимкотан (KHAM), оказались направлены в противоположную сторону, а вектор скорости пункта, расположенного на острове Уруп (URUP), претерпел значительный разворот. При этом

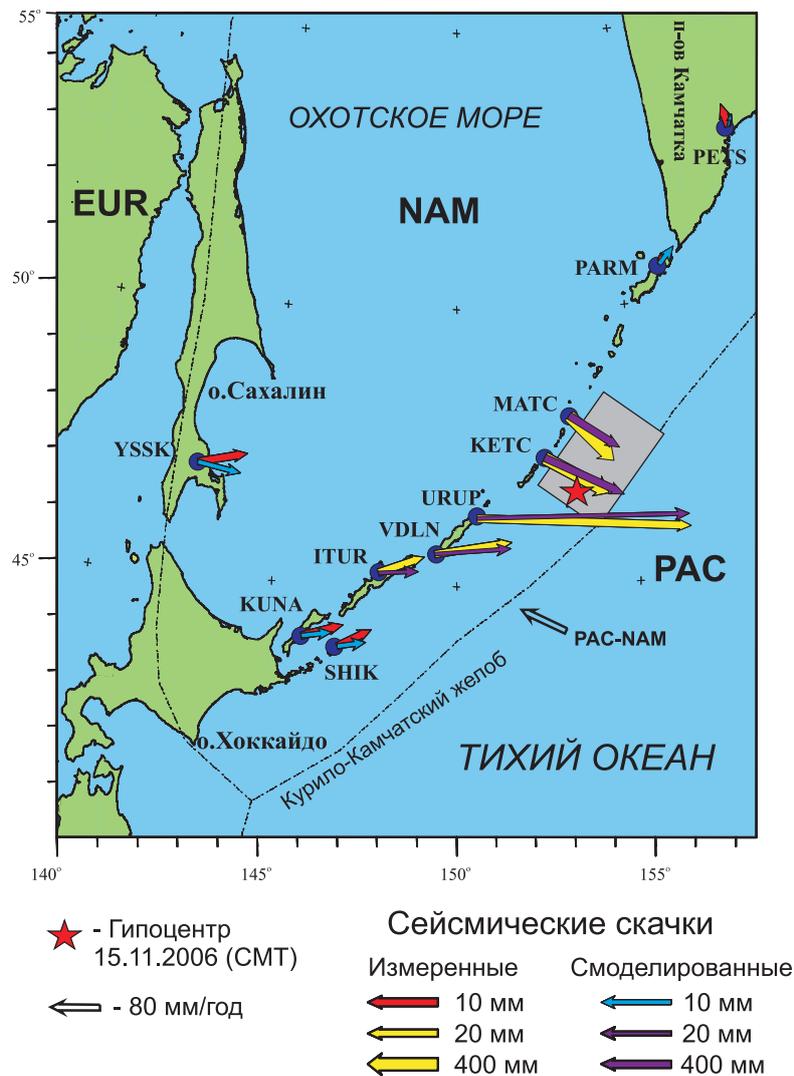


Рис. 1. Сейсмические смещения, зарегистрированные на станциях Курильской геодинимической сети во время первого Симуширского землетрясения 15 ноября 2006 г. Расшифровка обозначений: **EUR** – Евразийская тектоническая плита; **NAM** – Североамериканская тектоническая плита; **PAC** – Тихоокеанская тектоническая плита. Пунктирной линией показаны границы отмеченных на рисунке литосферных плит.

Fig. 1. Seismic slips recorded by stations of Kuril Geodynamic Survey during the first Simushir earthquake of 15 November 2006. Legend: **EUR** – Eurasian tectonic plate; **NAM** – North American tectonic plate; **PAC** – Pacific tectonic plate. The dotted line denotes boundaries of the lithospheric plates shown in the figure.

величина постсейсмической аномалии для ближайших к очагам пунктов КЕТС, МАТС, КНАМ, URUP убывает со временем: векторы скоростей этих пунктов, осредненные за период 28.07.2008 г. – 29.07.2009 г., меньше по величине векторов, осредненных за 02.08.2007 г. – 28.07.2008 г. Вышеперечисленные факты позволяют предположить наличие переходного постсейсмического процесса в районе очага сейсмического события 2006 г.

При установлении механизма, ответственного за наблюдаемые постсейсмические эффекты, следует учесть значительную пространственную (более 200 км) и временную (более 3.5 лет) распространенность

наблюдаемых эффектов. В связи с этим наиболее вероятным механизмом, объясняющим наблюдаемые постсейсмические аномалии, является процесс вязкоупругой релаксации в верхней мантии и астеносфере, так как выравнивание порового давления не может наблюдаться на расстоянии более 100 км от разлома, а упругое фрикционное развитие трещины является достаточно краткосрочным процессом и затухает, как правило, в течение первых месяцев после сейсмического события.

В соответствии с вышеописанной методологией оценивания параметров используемой модели была произведена оценка Максвелловской вязкости астено-

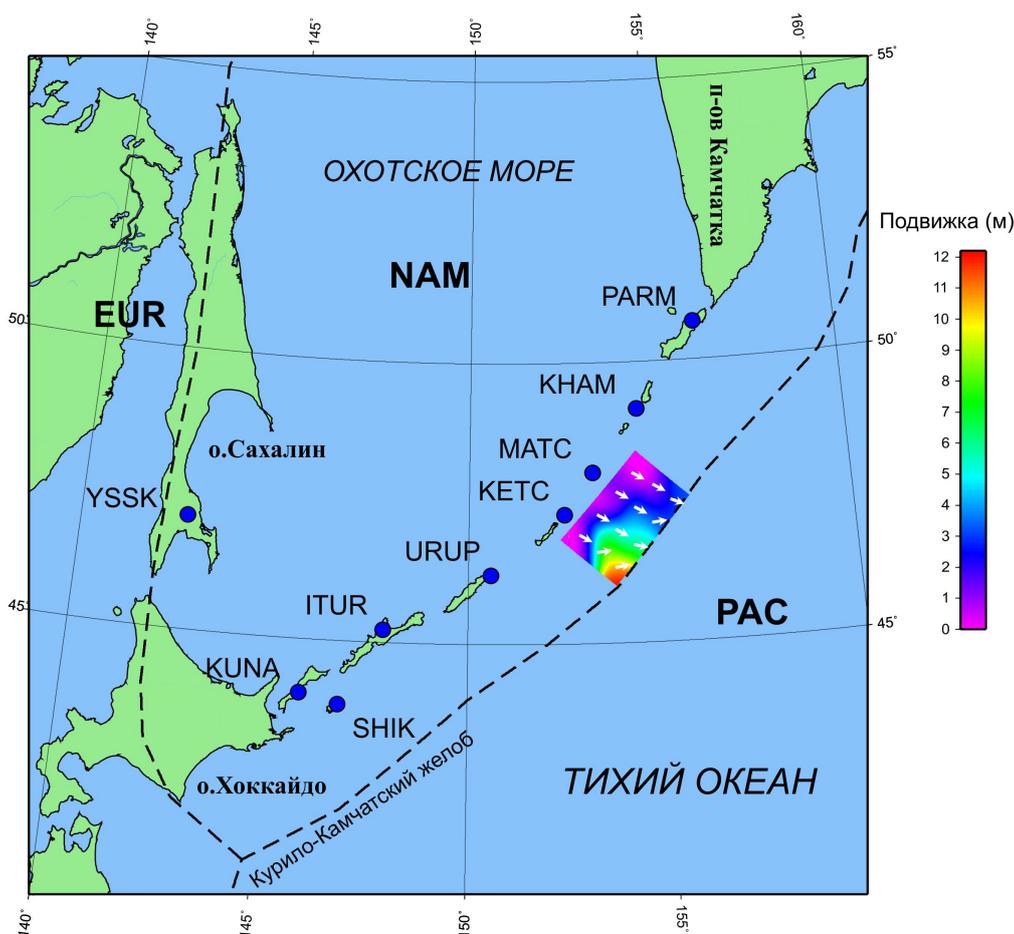


Рис. 2. Решение задачи моделирования подвижек в очаге Симуширского землетрясения 15 ноября 2006 г. по сейсмическим смещениям из [Steblov *et al.*, 2010]. Стрелками показаны направления подвижек, цвет отражает величину подвижки. Очаг ограничен областью ненулевой подвижки. Расшифровка обозначений: **EUR** – Евразийская тектоническая плита; **NAM** – Североамериканская тектоническая плита; **PAC** – Тихоокеанская тектоническая плита. Пунктирной линией показаны границы отмеченных на рисунке литосферных плит.

Fig. 2. Solution of the problem of modelling shearing in the focus of the Simushir earthquake of 15 November 2006 from seismic slips, according to [Steblov *et al.*, 2010]. Legend: **EUR** – Eurasian tectonic plate; **NAM** – North American tectonic plate; **PAC** – Pacific tectonic plate. The dotted line denotes boundaries of the lithospheric plates shown in the figure. Arrows show slip directions; colours denote slip values. The focus is bordered by the non-zero-slip area.

сферы по данным двух станций сети, на которых постсейсмический эффект проявился наиболее выражено, – MATC и KETC. В качестве априорного распределения подвижки было взято полученное ранее распределение подвижки в сейсмическом очаге по смещениям станций во время Симуширского землетрясения 2006 г. [Steblov *et al.*, 2008].

Для решения обратной задачи были использованы временные ряды этих станций за период 02.08.2007 г. – 28.07.2008 г. Получившаяся в результате оценка Максвелловской вязкости астеносферы для срединной части Курильской дуги составила $\sim 3 \cdot 10^{17}$ Па·с, что хорошо согласуется с интервалом значений $(2-5) \cdot 10^{17}$ Па·с для этого региона по другим источникам [Kogan *et al.*, 2011]. Эта величина достаточно мала по сравнению с априорным значением $1 \cdot 10^{19}$ Па·с, что позволяет ха-

рактеризовать срединную часть Курильской островной дуги как регион пониженной вязкости.

В результате построения модели с уточненным значением вязкости для станций MATC и KETC, расположенных вблизи очага, обнаружилось хорошее согласование между моделью и наблюдениями [Vladimirova *et al.*, 2011]. Однако для станций URUP и KHAM, на которых также проявились постсейсмические эффекты, но которые расположены в отдалении от очага, наблюдались значительные рассогласования между модельными и экспериментальными данными. Следовательно, смещения этих станций невозможно объяснить в рамках предложенной модели. Для того чтобы устранить влияние априорного выбора границ очаговой зоны, было принято решение о расширении границ априорного очага, изначально очерченных облаком

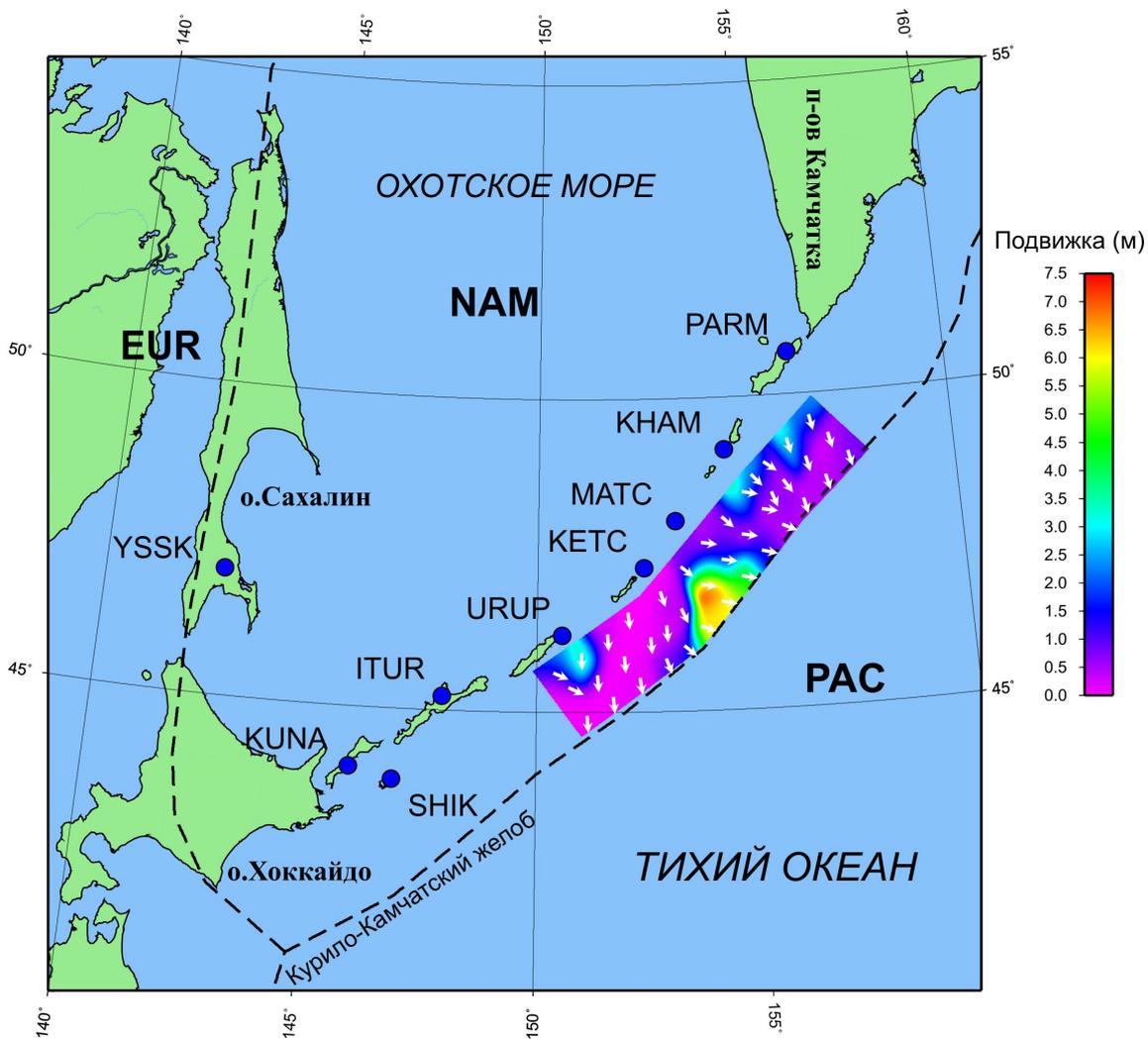


Рис. 3. Решение задачи моделирования подвижек в очаге Симуширского землетрясения 15 ноября 2006 г. по зарегистрированным постсейсмическим смещениям. Стрелками показаны направления подвижек, цвет отражает величину подвижки. Очаг ограничен областью ненулевой подвижки. Расшифровка обозначений: **EUR** – Евразийская тектоническая плита; **NAM** – Североамериканская тектоническая плита; **PAC** – Тихоокеанская тектоническая плита. Пунктирной линией показаны границы отмеченных на рисунке литосферных плит.

Fig. 3. Solution to the problem of modeling shearing in the focus of the Simushir earthquake of 15 November 2006 from recorded post-seismic events. Legend: **EUR** – Eurasian tectonic plate; **NAM** – North American tectonic plate; **PAC** – Pacific tectonic plate. The dotted line denotes boundaries of the lithospheric plates shown in the figure. Arrows show slip directions; colours denote slip values. The focus is bordered by the non-zero-slip area.

афтершоков. Очаговая зона при такой постановке ограничивается областью ненулевой подвижки в найденном распределении. В результате рассматривался очаг, продленный на юго-запад и северо-восток, общей протяженностью около 700 км. С использованием полученного очага и сферической слоистой модели Земли было проведено моделирование кумулятивных смещений после события 2006 г. на пунктах KETC, MATC, URUP и KHAM за период 02.08.2007 г. – 30.05.2010 г. В результате было найдено распределение подвижки в очаге события 2006 г., которое обеспечило хорошее согласование между моделью и экс-

периментом для всех четырех станций, на которых наблюдались постсейсмические эффекты. При этом при сопоставлении полученных результатов видно, что распределения подвижек в сейсмическом (рис. 2) и постсейсмическом (рис. 3) очагах не противоречат друг другу, поскольку область локализации максимальной подвижки сохраняет свое местоположение в обоих случаях.

Землетрясение Мауле 2010 г. 27 февраля 2010 г. в центральной части Чили, в непосредственной близости от города Консепсьон, произошло разрушительное землетрясение магнитудой $M_w=8.8$ (по данным СМТ).

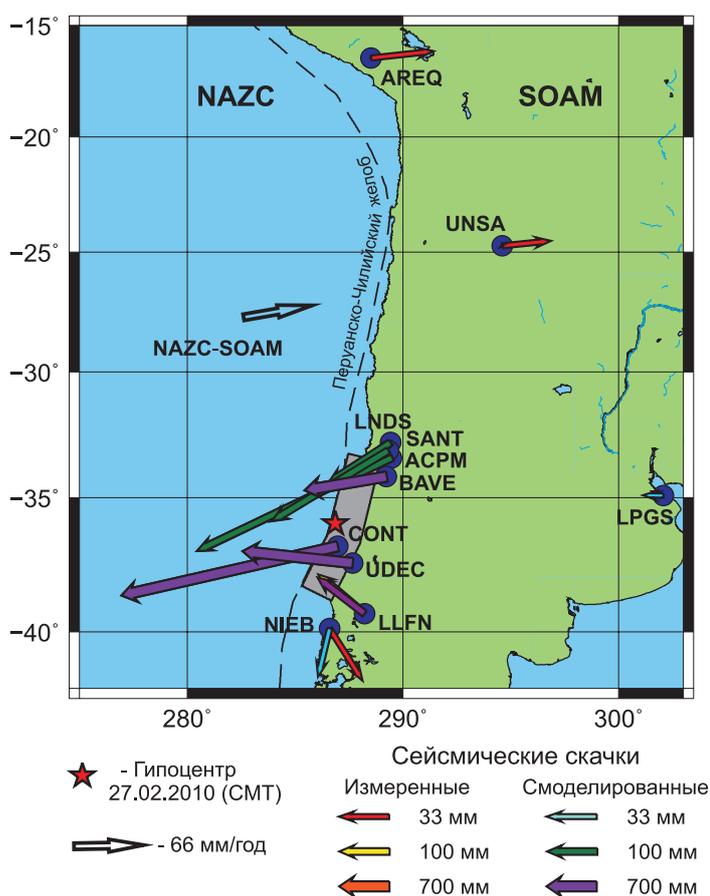


Рис. 4. Сейсмические смещения, зарегистрированные станциями GPS-наблюдений во время землетрясения Мауле 27 февраля 2010 г. Расшифровка обозначений: **SOAM** – Южноамериканская тектоническая плита; **NAZC** – тектоническая плита Наска. Пунктирной линией показаны границы отмеченных на рисунке литосферных плит.

Fig. 4. Seismic events recorded by GPS stations during the Maule earthquake of 27 February 2010. Legend: **SOAM** – South American tectonic plate; **NAZC** – Nazca tectonic plate. The dotted line denotes boundaries of the lithospheric plates given in the figure.

Это землетрясение стало самым сильным в регионе центрального Чили после Великого чилийского землетрясения 1960 г. Побережье Чили является областью высокой сейсмической активности: только с 1973 г. здесь было зафиксировано 13 событий с магнитудой больше 7.0. В регионе Центрального Чили плита Наска пододвигается под Южноамериканскую плиту со скоростью порядка 66 мм/год [Moreno et al., 2008, 2010]. Особенность этой субдукционной зоны состоит в том, что при погружении плиты Наска под Южноамериканскую плиту формируется не островная дуга, как, например, в случае с погружением Тихоокеанской плиты под Североамериканскую, а складчатая область на западе Южной Америки — горы Анды. Следствием это-

го является то, что слэб погружается в мантию под достаточно крутым углом [Delouis et al., 2010; Moreno et al., 2008].

В качестве границ очага сейсмического события 27.02.2010 г. были приняты границы облака афтершоков, размеры которого составили примерно 600 км по простиранию и 120 км по падению. Кроме того, на основе данных каталога сейсмических событий NEIC был рассчитан профиль исследуемой субдукционной зоны, который был использован при проведении процедуры дискретизации плоскости разрыва.

С использованием пакета GAMIT/GLOBK [Herring et al., 2006] была произведена обработка данных 31 GPS-станции, входящих в сети IGS (International GNSS Service) и RAMSAC (Red Argentina da Monitoro Sate-lial Continuo) за период 01.01.2010 г. – 29.07.2011 г. В результате обработки было установлено, что на 11 станциях были зафиксированы мгновенные смещения во время землетрясения Мауле 27.02.2010 г. (рис. 4), а выраженные постсейсмические смещения прослеживаются только на 9 станциях из 31.

Первым этапом исследования этого события стало нахождение распределения сейсмической подвижки в очаге по полученным смещениям станций по методике, описанной в [Steblov et al., 2008]. Согласно [Delouis et al., 2010; Lay et al., 2010], разрыв возник на глубине приблизительно 32 км и распространился в обе стороны от гипоцентра, образовав в результате две основные области максимальной подвижки на ЮЮЗ и ССВ концах разрыва. Полученное распределение сейсмической подвижки в очаге, показанное на рис. 5, достаточно хорошо согласуется с распределениями смещений во время события 27.02.2010 г. [Delouis et al., 2010; Moreno et al., 2010]. На рисунке также выделяются две доминирующие области максимальной подвижки, расположенные вблизи станций CONT, UDEC и BAVE.

Для исследования постсейсмических процессов, сопровождающих землетрясение Мауле, были выбраны измерения всех 9 станций, на которых наблюдаются постсейсмические смещения, за период с 01.06.2010 г. по 29.07.2011 г. Подобный выбор начальной точки отсчета дает основание предполагать, что интенсивность процесса упругого фрикционного развития трещины значительно снизится к этому времени, а значит, постсейсмические смещения станций будут обусловлены преимущественно процессом вязкоупругой релаксации в верхней мантии и астеносфере.

В качестве первого этапа изучения постсейсмического эффекта, сопровождающего землетрясение Мауле, было произведено оценивание Максвелловской вязкости астеносферы для региона Центрального Чили. По геологическим данным вязкость астеносферы в этом регионе составляет $1 \cdot 10^{21}$ Па·с [Piersanti, 1999]. Согласно данным различных исследователей, значение вязкости астеносферы в регионе Центрального Чили варьируется от $2 \cdot 10^{17}$ Па·с до $1 \cdot 10^{20}$ Па·с [Piersanti,

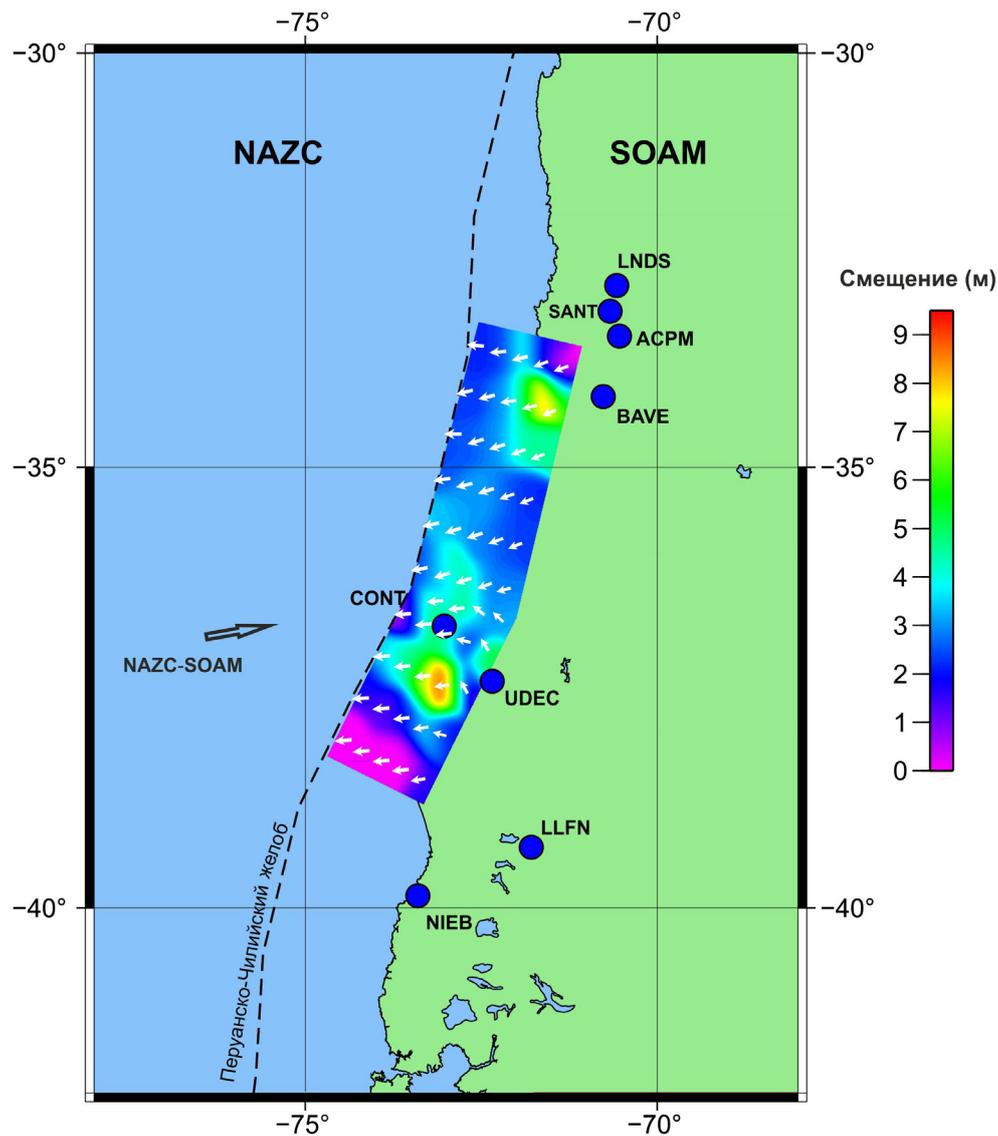


Рис. 5. Решение задачи моделирования подвижек в очаге землетрясения Мауле 27 февраля 2010 г. по сейсмическим смещениям. Стрелками показаны направления подвижек, цвет отражает величину подвижки. Очаг ограничен областью ненулевой подвижки. Расшифровка обозначений: **SOAM** – Южноамериканская тектоническая плита; **NAZC** – тектоническая плита Наска. Пунктирной линией показаны границы отмеченных на рисунке литосферных плит.

Fig. 5. Solution to the problem of modelling shearing in the focus of the Maule earthquake of 27 February 2010 from seismic slips. Legend: **SOAM** – South American tectonic plate; **NAZC** – Nazca tectonic plate. The dotted line denotes boundaries of the lithospheric plates given in the figure. Arrows show slip directions; colours denote slip values. The focus is bordered by the non-zero-slip area.

1999]. Вероятно, одной из причин различия полученных значений вязкости на несколько порядков являются латеральные неоднородности толщины слоя астеносферы, которые могут оказывать влияние на развитие постсейсмических процессов. Еще одной причиной рассогласований может являться возможное наличие слоя с низкой вязкостью в нижней части коры [Piersanti, 1999]. Полученное в результате моделирования значение Максвелловской вязкости астеносферы составило $6 \cdot 10^{18}$ Па·с, что укладывается в упомянутый выше диапазон значений для вязкости астеносферы в

данном регионе.

Для устранения влияния выбора границ априорного очага при моделировании распределения подвижки в очаге по постсейсмическим данным было принято решение о расширении границ области нахождения распределенной подвижки таким образом, чтобы она заведомо превосходила возможное простираение очага. Результирующие размеры зоны, в которой моделировалась подвижка, составили порядка 1100 км по простираению и 150 км по падению. В результате применения вышеописанной методики оценки параметров

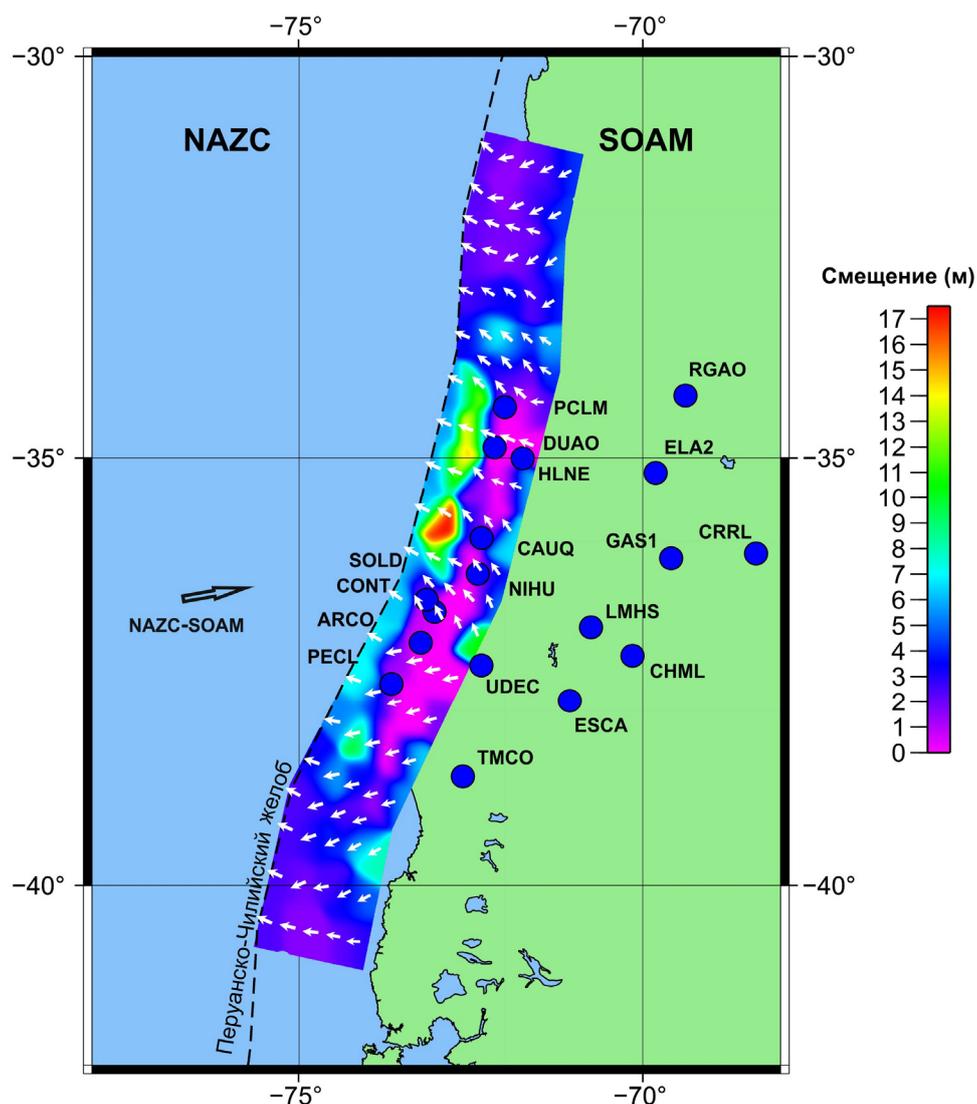


Рис. 6. Решение задачи моделирования подвижек в очаге землетрясения Мауле 27 февраля 2010 г. по постсейсмическим смещениям. Стрелками показаны направления подвижек, цвет отражает величину подвижки. Очаг ограничен областью ненулевой подвижки. Расшифровка обозначений: **SOAM** – Южноамериканская тектоническая плита; **NAZC** – тектоническая плита Наска. Пунктирной линией показаны границы отмеченных на рисунке литосферных плит.

Fig. 6. Solution to the problem of modelling shearing in the focus of the Maule earthquake of 27 February 2010 from recorded postseismic events. Legend: **SOAM** – South American tectonic plate; **NAZC** – Nazca tectonic plate. The dotted line denotes boundaries of the lithospheric plates given in the figure. Arrows show slip directions; colours denote slip values. The focus is bordered by the non-zero-slip area.

очага по постсейсмическим смещениям было найдено распределение постсейсмической подвижки в очаге для землетрясения Мауле (рис. 6). Это распределение не противоречит распределению сейсмической подвижки в очаге (см. рис. 5), поскольку сохраняются обе области максимальных смещений, но в нем присутствуют дополнительные области ненулевых смещений, выходящие за границы первоначального сейсмического очага. Следует отметить, что практически не наблюдается расширения очаговой зоны в северном направлении, что согласуется с предположением о наличии барьера прочности в этой области [Moreno et al.,

2010].

В рамках найденной модели для ряда станций наблюдается достаточно хорошее согласование между моделью и экспериментом, однако для части пунктов наблюдаются значительные рассогласования. Может существовать несколько объяснений подобных расхождений. Одно из них – слишком короткий период наблюдений (около года) для исследования постсейсмических процессов. Второе, более вероятное, заключается в том, что на наблюдаемое движение станций значительный эффект оказывают дополнительные деформационные составляющие, вызванные расположе-

нием станций в сильнодеформируемой зоне, в непосредственной близости от Перуанско-Чилийского жлоба, а также влиянием на их движение системы активных разломов, укоренившихся в субдукционном интерфейсе [Moreno et al., 2008; Contreras-Reyes et al., 2010]. Для устранения наблюдаемых рассогласований, а следовательно, для уточнения параметров найденной модели необходимо в дальнейшем учесть эти факторы.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика интерпретации постсейсмических эффектов дает возможность адекватного моделирования переходных процессов, сопровождающих сильные субдукционные землетрясения. Методика основана на прямом оценивании вязкости астеносферы в исследуемом регионе и на выявленной принципиальной возможности построения эффективного распределения подвижки в очаге землетрясения по постсейсмическим смещениям, полученным методами космической геодезии. Результат таких оценок и построений позволяет прогнозировать интенсивность затухания вязкоупругих напряжений в астеносфере, что необходимо для решения задачи корректного оценивания накапливающегося упругого сейсмогенного потенциала.

С использованием вышеописанной методики были исследованы постсейсмические эффекты, сопровождающие первое Симуширское землетрясение 15.11.2006 г. и землетрясение Мауле 27.02.2010 г. Полученные результаты показывают возможность применения обобщенного подхода к исследованию и интерпретации интенсивных постсейсмических эффектов

после крупных субдукционных землетрясений, произошедших в различных по геологическому и тектоническому строению регионах Земли.

Выявленные особенности развития переходных процессов в различных по строению субдукционных регионах позволят в дальнейшем усовершенствовать предложенную методику за счет моделирования латеральных неоднородностей деформирования пограничной зоны взаимодействия литосферных плит.

Отдельный интерес для дальнейшего исследования представляет интерпретация выявленных различий между сейсмической и постсейсмической моделями распределения подвижки в очаге. Природа этих различий лежит, по-видимому, в особенностях развития афтершокового процесса, сопровождающего сильное землетрясение в первые месяцы после основного толчка. В связи с этим, наиболее перспективным направлением дальнейшего развития исследования постсейсмических процессов после крупных землетрясений представляется изучение процесса развития очага со временем, а также моделирование краткосрочных постсейсмических процессов для учета их вклада в суммарный наблюдаемый постсейсмический эффект.

8. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность заведующему сектором геодинамического мониторинга Геофизической службы РАН д.ф.-м.н. Г.М. Стеблову, а также профессору Lamont-Doherty Earth Observatory д.ф.-м.н. М.Г. Когану за обсуждение работы на всех стадиях и конструктивные замечания.

9. ЛИТЕРАТУРА

- Boschi L., Piersanti A., Spada G., 2000. Global postseismic deformation: Deep earthquakes. *Journal of Geophysical Research* 105 (B1), 631–652. <http://dx.doi.org/10.1029/1999JB900278>.
- Burgmann R., Kogan M.G., Levin V.E., Scholz C.H., King R.W., Steblov G.M., 2001. Rapid aseismic moment release following the 5 December, 1997 Kronotsky, Kamchatka, earthquake. *Geophysical Research Letters* 28 (7), 1331–1334. <http://dx.doi.org/10.1029/2000GL012350>.
- Contreras-Reyes, E., Flueh E.R., Grevemeyer I., 2010. Tectonic control on sediment accretion and subduction off south central Chile: Implications for coseismic rupture processes of the 1960 and 2010 megathrust earthquakes. *Tectonics* 29 (6), TC6018. <http://dx.doi.org/10.1029/2010TC002734>.
- Delouis, B., Nocquet J.-M., Vallée M., 2010. Slip distribution of the February 27, 2010 Mw=8.8 Maule earthquake, Central Chile, from static and high-rate GPS, InSAR, and broadband teleseismic data. *Geophysical Research Letters* 37 (17), L17305. <http://dx.doi.org/10.1029/2010GL043899>.
- Herring T.A., King R.W., McClusky S.C., 2006. GAMIT/GLOBK Reference Manual Release 10.3. MIT. Available from <http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/docs.htm> (last accessed May 20, 2012).
- Hetland E.A., Hager B.H., 2006. The effects of rheological layering on post-seismic deformation. *Geophysical Journal International* 166 (1), 277–292. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02974.x>.
- Kogan M.G., Steblov G.M., 2008. Current global plate kinematics from GPS (1995–2007) with the plate-consistent reference frame. *Journal of Geophysical Research* 113 (B4), B04416. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JB005353>.
- Kogan M.G., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Freymueller J.T., Steblov G.M., Levin B.W., Prytkov A.S., 2011. The mechanism of postseismic deformation triggered by the 2006–2007 great Kuril earthquakes. *Geophysical Research Letters* 38 (6), L06304. <http://dx.doi.org/10.1029/2011GL046855>.
- Lay T., Ammon C.J., Kanamori H., Koper K.D., Sufri O., Hutko A.R., 2010. Teleseismic inversion for rupture process of the

- 27 February 2010 Chile (Mw 8.8) earthquake. *Geophysical Research Letters* 37 (13), L13301. <http://dx.doi.org/10.1029/2010GL043379>.
- Marone C.J., Scholz C.H., Bilham R.G., 1991. On the mechanics of earthquake afterslip. *Journal of Geophysical Research* 96 (B5), 8441–8452. <http://dx.doi.org/10.1029/91JB00275>.
- Moreno M.S., Klotz J., Melnick D., Echlter H., Bataille K., 2008. Active faulting and heterogeneous deformation across a megathrust segment boundary from GPS data, south central Chile (36–39°S). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9 (12), Q12024. <http://dx.doi.org/10.1029/2008GC002198>.
- Moreno M., Rosenau M., Oncken O., 2010. Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. *Nature* 467 (7312), 198–202. <http://dx.doi.org/10.1038/nature09349>.
- Panet I., Pollitz F., Mikhailov V., Diamant M., Banerjee P., Grijalva K., 2010. Upper mantle rheology from GRACE and GPS postseismic deformation after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11 (6), Q06008. <http://dx.doi.org/10.1029/2009GC002905>.
- Piersanti A., 1999. Postseismic deformation in Chile: Constraints on the asthenospheric viscosity. *Geophysical Research Letters* 26 (20), 3157–3160. <http://dx.doi.org/10.1029/1999GL005375>.
- Pollitz F.F., 1997. Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical earth. *Journal of Geophysical Research* 102 (B8), 17921–17941. <http://dx.doi.org/10.1029/97JB01277>.
- Pollitz F.F., 2003. Post-seismic relaxation theory on a laterally heterogeneous viscoelastic model. *Geophysical Journal International* 155 (1), 57–78. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01980.x>.
- Pollitz F., Bürgmann R., Banerjee P., 2006. Post-seismic relaxation following the great 2004 Sumatra-Andaman earthquake on a compressible self-gravitating Earth. *Geophysical Journal International* 167 (1), 397–420. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03018.x>.
- Steblov G.M., Grekova T.A., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I., 2010. Dynamics of the Kuril-Kamchatka subduction zone from GPS data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 46 (5), 440–445. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351310050095>.
- Steblov G.M., Kogan M.G., Levin B.V., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I., 2008. Spatially linked asperities of the 2006–2007 great Kuril earthquakes revealed by GPS. *Geophysical Research Letters* 35 (22), L22306. <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL035572>.
- Vladimirova I.S., Steblov G.M., Frolov D.I., 2011. Viscoelastic deformations after the 2006–2007 Simushir earthquakes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 47 (11), 1020–1025. <http://dx.doi.org/10.1134/S106935131100132>.



Владимирова Ирина Сергеевна, м.н.с
Геофизическая служба РАН
249035, Обнинск, пр. Ленина, 189, Россия
Тел.: (48439)31405; ✉ e-mail: vladis@gsras.ru

Vladimirova, Irina S., Junior Researcher
Geophysical Survey RAS
249035, Obninsk, Lenin str., 189, Russia
Tel.: (48439)31405; ✉ e-mail: vladis@gsras.ru