ГЕОТЕКТОНИКА, 2023, № 3, с. 78–93

УДК 550.34

СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ МАУЛИ (27.02.2010 г., M_w = 8.8) В ЧИЛИ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАПАДНОЙ ОКРАИНЫ ЮЖНО-АМЕРИКАНСКОЙ ЛИТОСФЕРНОЙ ПЛИТЫ

© 2023 г. В. Н. Морозов[1], А. И. Маневич[1, *]

[1]Геофизический центр РАН, д. 3, Молодежная ул., 119296 Москва, Россия

**e-mail: a.manevich@gcras.ru*

Поступила в редакцию 13.03.2023 г.
После доработки 31.03.2023 г.
Принята к публикации 11.04.2023 г.

В статье рассмотрены сейсмотектонические следствия сильного Чилийского землетрясения Маули с магнитудой M_w = 8.8, произошедшего 27 февраля 2010 г. в Чили, как проявление крупномасштабного геологического события общего сейсмотектонического процесса на западной окраине Южно-Американской плиты (Чилийский сектор). В нашем исследовании показано, что проявления постсейсмических процессов землетрясения Маули захватывают значительно большую область по сравнению с эпицентральной зоной афтершоков. На основе сопоставления результатов проведенного численного моделирования напряженно-деформированного состояния литосферы до и после землетрясения, сейсмологических, геодезических и спутниковых данных нами предлагается альтернативная модель развития сейсмотектонического процесса в районе Чилийского сектора Южно-Американской литосферной плиты. Моделирование напряженно-деформированного состояния было выполнено методом конечных элементов. Очаг землетрясения Маули, расположенный на глубине 33 км, попадает в область относительно высоких значений напряжений сжатия и положительных максимальных напряжений сдвига. Показано, что и другие сильные землетрясения Чилийского сектора в интервале глубин от 20 до 50 км вызваны высокой концентрацией тектонических напряжений в области перехода от океанической к континентальной литосфере. В предложенной модели сейсмотектонического процесса показано, что после сильных землетрясений, разрывы ослабляют контакт между океанической и континентальной литосферой. Резкое погружение континентальной литосферы в мантию вызывает возрастание давления вязкого расплава, что способствует его проникновению в трещины и подъему к поверхности, вызывая последующие вулканические извержения. Показано, что полученные результаты, в сопоставлении с косейсмическими последствиями землетрясения не противоречат полученными нами результатам численного моделирования и дают новые представления о строении литосферы в переходной зоне континент–океан и развитии сейсмотектонического процесса.

Ключевые слова: Южно-Американская литосферная плита, землетрясение Маули, плита Наска, Чилийский желоб, напряженно-деформированное состояние, разлом, численное моделирование

DOI: 10.31857/S0016853X23030049, **EDN:** XLUALS

ВВЕДЕНИЕ

В Чили на побережье центрального района 27 февраля 2010 года в 6 час. 34 мин UTC произошло сильное землетрясение, названное впоследствии Маули, с магнитудой M_w = 8.8, очаг землетрясения находился на глубине 33 км [21]. В густонаселенных районах Чили погибло около 800 человек, материальный ущерб превысил 30 млрд долларов США [17]. Землетрясение Маули вызвало цунами, достигшее берегов Новой Зеландии и Японии [37].

Протяженность зоны тектонической деструкции составила ~500 км при ширине ~ 100 км (рис. 1). Эпицентр землетрясения Маули находился между эпицентральными зонами двух сильных предшествующих землетрясений, которые произошли в этом районе [23, 25]:

– на юге, землетрясение 1960 г., M = 9.5;

– на севере, землетрясение 1985 г., M = 8.

11 марта 2010 г. было зарегистрировано два сильнейших афтершока в 200 км севернее,

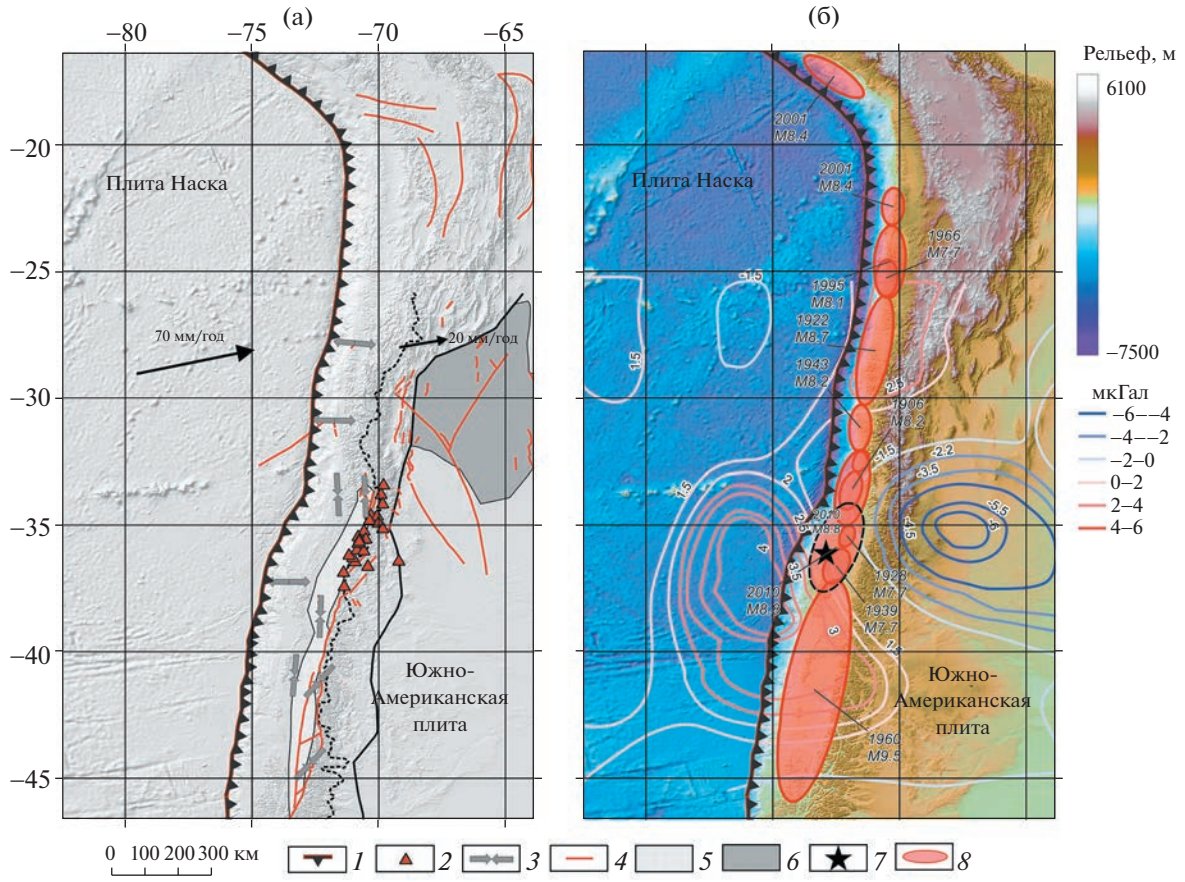


Рис. 1. Схема региона исследования.
(а) – карта-схема региональных морфотектонических элементов Чилийских Анд (по [24, 25];
(б) – области эпицентров афтершоков сильных землетрясений западного побережья Южно-Американской плиты (Чилийский сектор) и аномалии силы тяжести после землетрясения Маули на 2015 г. (по [14, 30]).
1 – Чилийский желоб; *2* – вулканы; *3* – направление осей сжатия-растяжения (по [25]); *4* – региональные разломы системы Чилийских Анд; *5* – центральная депрессия Чилийских Анд; *6* – Пампинские Сьерры; *7* – эпицентр землетрясения Маули 27.02.2010 $M_w = 8.8$; *8* – области афтершоков сильных землетрясений

последовавших друг за другом в течение 15 минут с $M = 7.0$ и $M = 6.9$ соответственно [32].

После главного толчка в течение 30 суток было зарегистрировано [17]:

– 1300 афтершоков, $M > 4$;

– 19 афтершоков, $M \geq 6$.

Землетрясение вызвало значительные деформации земной поверхности. Горизонтальные смещения достигали – 5.3 м, вертикальные – 2.4 м, а опускание дна в пределах прибрежной депрессии более 1.0 м [6, 36].

Детальные исследования сейсмотектонического процесса после землетрясения Маули 2010 г., продолжающиеся и в настоящее время, обусловлены необходимостью выявить причины, вызывающие такие сильные тектонические события.

Возросшая густота сети сейсмических станций, чувствительность аппаратуры, новые методы обработки данных в сочетании с методами глобальных навигационных спутниковых систем и радарной спутниковой интерферометрии с синтезированной апертурой открывают новые возможности в интерпретации результатов, и, следовательно, – изучения генезиса сильных тектонических землетрясений в этом районе.

Цель настоящей работы заключается в разработке альтернативной модели строения литосферы и проведение моделирования напряженно-деформированного состояния литосферы при землетрясении Маули в сочетании с сейсмологическими данными для объяснения сейсмотектонических процессов в Чилийском сегменте западной окраины Южно-Американской плиты, дающих основание полагать, что предлагаемая модель не противоречит имеющимся геолого-геофизическим данным и имеет перспективу в своем развитии.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Горный пояс Анд является одной из самых протяженных горных систем в мире и протягива-

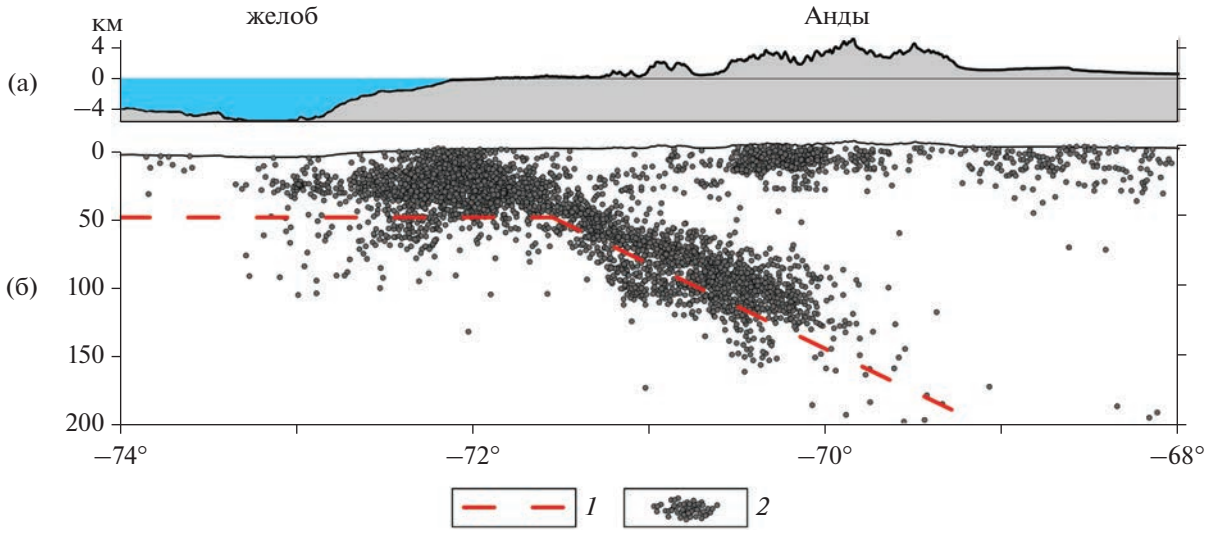


Рис. 2. Гипоцентры фоновой сейсмичности за период с января 1986 г. по декабрь 2001 г. (по данным [13], с дополнениями).
(а) – топографический профиль региона исследования;
(б) – гипоцентры фоновой сейсмичности.
1 – предполагаемая граница литосфера–верхняя мантия; *2* – гипоцентры землетрясений

ется на более чем 8000 км вдоль Тихоокеанского побережья Южной Америки. Отрезок Анд в пределах Чили составляет около 4000 км. В геологическом отношении Чилийские Анды можно разделить на три основные зоны – восточную, центральную и западную [9, 25]. Восточная зона состоит в основном из палеозойских и мезозойских отложений, таких как каменноугольные пласты, сланцы, песчаники и известняки. Центральная зона, наиболее высокая часть гор, состоит в основном из гранитных и гнейсовых пород, образовавшихся во время орогенеза кайнозойской эры. В западной зоне, которая находится ближе к Тихому океану, преобладают вулканические породы – андезиты и базальты, образованные в результате активности многочисленных вулканов [4].

Разломы Чилийской зоны образуют сложные и протяженные системы. Таким примером является Атакамская система разломов. Входящие в нее разломы простираются вдоль края континента. Возникновение Атакамской системы разломов относится к допозднемеловому времени, – движения по разломам, выраженные в рельефе, и продолжаются в настоящее время [9]. В конце юрского периода в Чилийских Андах отмечаются крупные тектонические движения, характерные для окраин Тихого океана и не имеющие столь существенного значения в других частях Земли [9].

Сектор Чилийских Анд является одной из наиболее сейсмических активных областей в мире, что связывается с его географическим положением [13, 25]. Он расположен в зоне активного взаимодействия Южно-Американской и Тихоокеанских литосферных плит. В результате масштабного тектонического процесса в Чилийском секторе Южно-Американской плиты продолжаются активные геологические процессы современного тектоногенеза, включая сейсмичность и активный вулканизм [4, 10, 12, 13, 25].

Кинематика сейсмотектонического процесса базируется на представлении о тектонических напряжениях в земной коре и литосфере, как основной причине накопления и реализации сейсмической энергии. При этом базовой основой напряженно-деформированного состояния западной окраины Южно-Американской плиты является субдукционная модель погружения под нее плиты Наска [1–4, 7, 9–12, 24].

СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЭПИЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ МАУЛИ

Сильные землетрясения $M > 7.7$ западной окраины Южно-Американской плиты (ЮАП) образуют закономерную вытянутую площадь локализации афтершоков, протяженностью >5000 км вдоль западной окраины ЮАП, шириной ~100–150 км с глубиной гипоцентров до 50 км (см. рис. 1, б). Гипоцентры землетрясений $M < 6$ локализованы в интервале глубин от 0–100 км и более км. Гипоцентры фоновой сейсмичности $M > 4$ в широтном разрезе в интервале 33°–35° ю.ш. формируют зону сейсмотектонической деструкции, погружающейся в направлении под континент (зона Беньоффа), характерную для всей западной окраины Южно-Американской плиты (рис. 2).

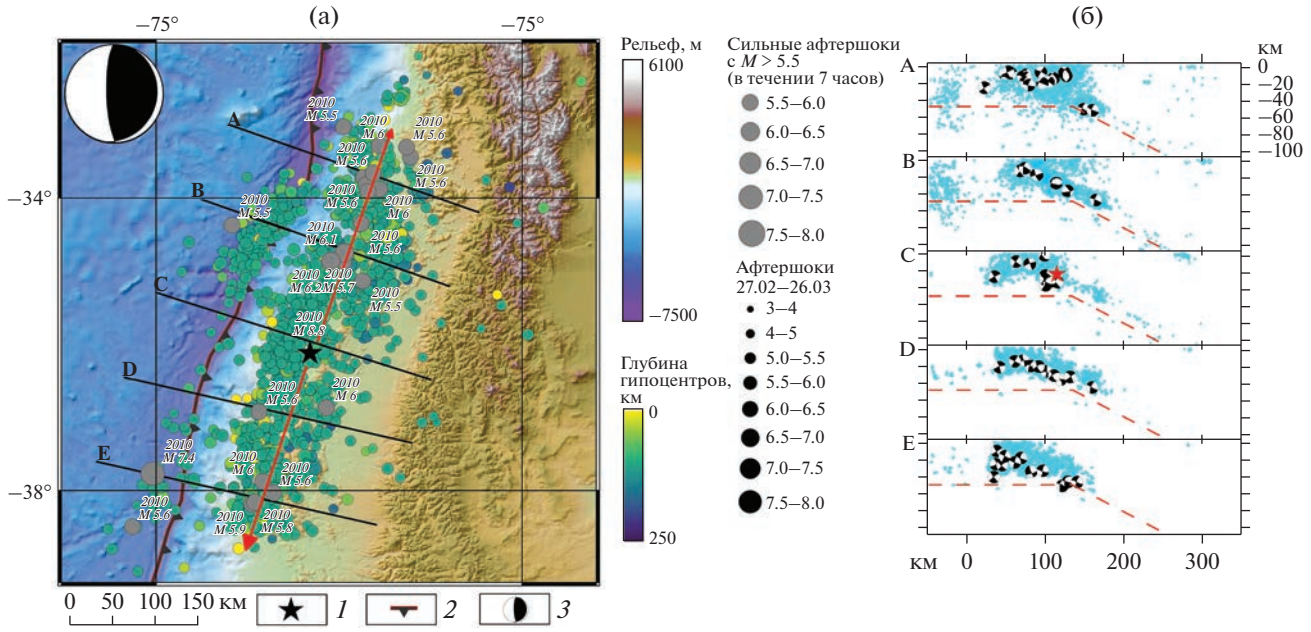


Рис. 3. Эпицентр и афтершоки землетрясения Маули, сильные афтершоки $M > 5.5$ за первые 7 часов после главного сейсмического события, афтершоки $M > 3$ за период 27 февраля–26 марта 2010 г. (по данным [31], с дополнениями). Показаны (стрелки красным) направления распространения сейсмического разрыва.
(а) – эпицентр, афтершоки и направление разрыва землетрясения;
(б) – положение гипоцентров афтершоков;
1 – эпицентр землетрясения Маули 27.02.2010 г., $M_w = 8.8$; *2* – Чилийский желоб; *3* – механизмы очага

Землетрясение Маули, произошедшее 27.02.2010, $M_w = 8.8$, является сильнейшим после землетрясения 1960 г. с магнитудой $M_w = 9.5$ и его эпицентральная зона перекрывает предшествующие землетрясения – 1939 г. $M_w = 7.7$, 1928 г. $M_w = 7.7$ [23] (см. рис. 1, б). Перед землетрясением Маули почти 70 лет наблюдался период сейсмического затишья после землетрясения 1939 г. Этот период является, вероятно, временем накопления упругой потенциальной энергии тектонических напряжений, реализованной в процессе землетрясения Маули.

По данным USGS координаты эпицентра землетрясения Маули следующие: 36.122° ю.ш. и 72.898° з.д. при глубине гипоцентра 33 км [20, 21]. Механизм очага соответствует взбросо-сдвигу. Разрыв из очага в течение ~ 100 с распространился в северо-восточном и юго-западном направлениях, общей протяженностью ~ 500 км, со средней скоростью 2.7 км/с [21]. В течение семи часов после главного толчка было зарегистрировано 25 сильных афтершоков $M_w > 5.5$ в интервале глубин от 10 до 30 км (рис. 3).

К афтершокам землетрясения относятся также два сильных землетрясения, которые произошли через 12 дней после землетрясения Маули, с эпицентрами, расположенными севернее эпицентра землетрясения Маули [31]:

– $M_w = 7.2$ (34.287° ю.ш., 71.657° з.д.), глубина очага 44 км;

– $M_w = 6.9$ (34.290° ю.ш., 71.950° з.д.), глубина очага 35 км.

За период с 27 февраля по 26 марта 2010 г. было зарегистрировано 1300 афтершоков $M_w > 4.0$ [17].

Данные обработки объемных волн (метод инверсии), отражающие кинематику распространяющегося разрыва, хотя не всегда сопоставимы и не дают реальной картины генерации накопленной упругой энергии в плоскости разрыва при его распространении, тем не менее они позволяют считать, что разрыв в прибрежной зоне, вызывающий цунами, распространяется на глубины не более 50 км, в то время как по латерали имеет протяженность ~500 км [21, 22, 27, 37].

Нижний 50-ти км предел возможного распространения тектонического разрыва землетрясения, как и при других сильных землетрясениях, не находит в настоящее время логического объяснения в рамках субдукционной модели взаимодействия плиты Наска и Южно-Американской плиты.

Образование сейсмогенного разрыва землетрясения Маули сопровождалось косейсмическими смещениями поверхности эпицентральной зоны [36] (см. рис. 3, рис. 4):

– горизонтальные, в западном направлении, до 5 м;

– вертикальные поднятия – 2 м;

– опускания – 1 м.

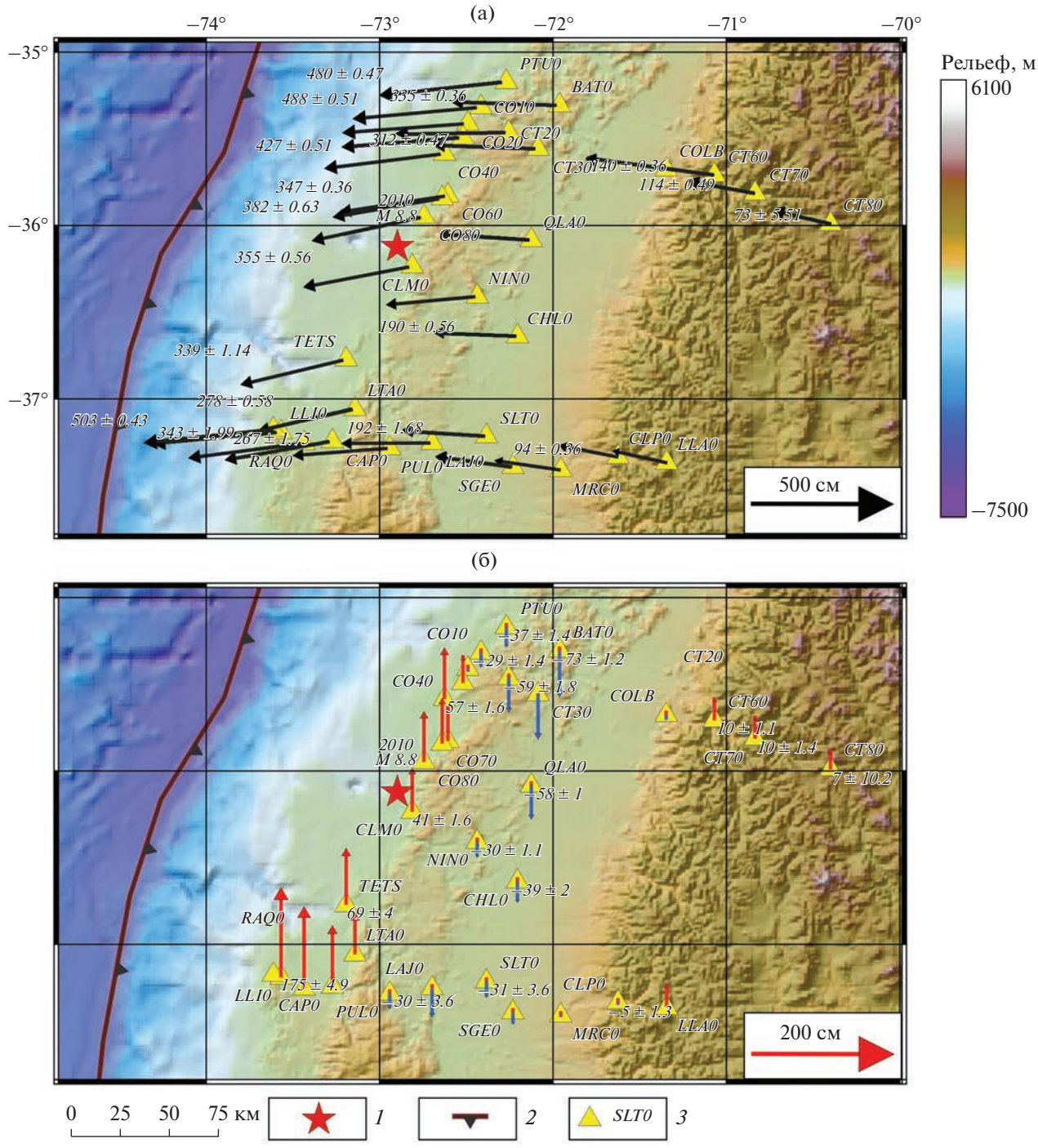


Рис. 4. Поле косейсмических смещений (по данным [36]).
(а) – горизонтальные смещения;
(б) – вертикальные смещения.
Обозначено: горизонтальные смещения (стрелки черным); поднятия (стрелки красным); опускания (стрелки синим).
1 – эпицентр землетрясения Маули 27.02.2010 г., $M_w = 8.8$; *2* – Чилийский желоб; *3* – станции ГНСС

Опускание поверхности в пределах прибрежной депрессии образовало вытянутую зону, протяженностью >300 км при ширине 100 км. Горизонтальные смещения в г. Буэнос-Айрос, на расстоянии >1000 км от эпицентральной области достигали 5 см, подтверждающее, что развитие сейсмотектонического процесса выходит за пределы эпицентральной зоны, т.е. зоны локализации афтершоков, поле смещений не ограничивается площадью афтершоков [36].

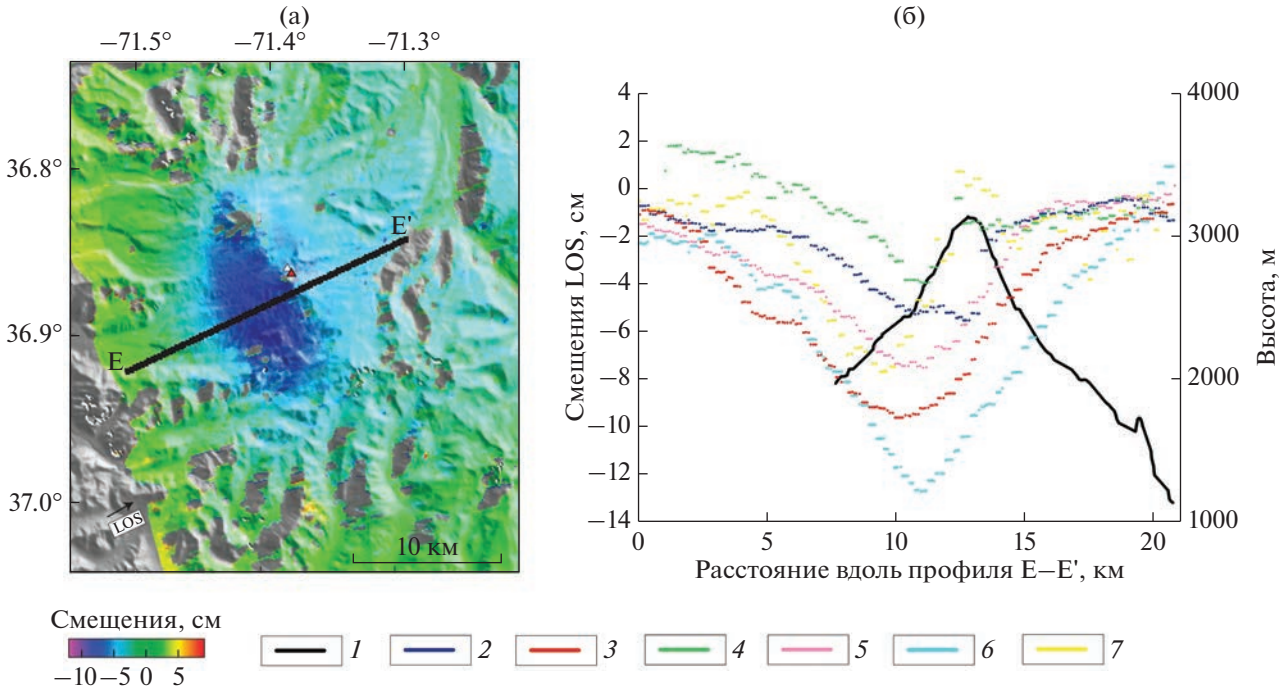


Рис. 5. Оседания кальдеры вулкана Невадос-де-Чиллиан (по данным [29]).
(а) – интерферограмма смещений за период 1 марта 2007 г.–12 марта 2011 г.;
(б) – временны́е интервалы интерферограмм смещений по разрезу E–E'.
1 – уровень земной поверхности; *2*–*7* – временной интервал смещений по разрезу: *2* – 30 января–10 апреля 2010, *3* – 3 марта 2008–24 апреля 2010, *4* – 1 марта 2007–9 марта 2010, *5* – 3 февраля 2008–26 марта 2010, *6* – 8 февраля 2010–26 марта 2010, *7* – 18 апреля 2008–12 марта 2011

Постсейсмический деформационный процесс захватил также часть вулканического пояса, прилегающего к эпицентральной зоне землетрясения Маули (см. рис. 1, а). Использование методов спутниковой радарной интерферометрии с синтезированной апертурой (InSAR) [29] позволило установить значительные оседания вулканических кальдер, достигающих 15 см, восточнее эпицентральной зоны землетрясения Маули, – подобные оседания кальдер вулканов известны в Японии после землетрясения Тохоку в 2011 г. [34, 35] (рис. 5).

После землетрясения Маули было зарегистрировано изменение гравитационного поля [6, 30] (см. рис. 1, б). Постсейсмические изменения гравитационного поля, достигающие до +10 мкГал в океане и –10 мкГал на континенте, захватывают значительно бóльшую область по сравнению с эпицентральной зоной афтершоков, что актуально для объяснения в едином контексте происходящего процесса.

Полагаем и считаем важным подчеркнуть, что сильные землетрясения, являясь следствием тектонического процесса, отражают его основные характеристики, а также его развитие в пределах западной окраины Южно-Американской плиты.

Далее будем исходить из предположения, что сейсмическая активность в переходной зоне континент–океан связана с упругими деформациями литосферы под воздействием тектонических напряжений и их пространственная концентрация определяет особенности развития сейсмотектонического процесса.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ КОНТИНЕНТ–ОКЕАН (ЧИЛИЙСКИЙ СЕКТОР)

Основываясь на разработанной ранее модели [7, 26] строения литосферы западной окраины Южно-Американской плиты, мы представляем численное развитие нашей модели с использованием геофизических данных о мощности литосферы в этом районе, – нами построен гипотетический широтный разрез литосферы Южно-Американской плиты вдоль ~22° ю.ш. [16, 22, 24, 25, 28] (рис. 6).

На западной окраине Южно-Американской плиты мощность литосферы принята равной 50 км, с погружением на восток до 200 км и последующим подъемом до границы литосферы–верх-

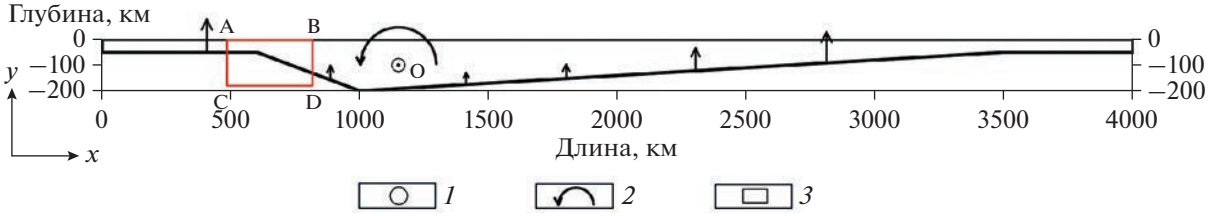


Рис. 6. Модель-расчетная схема широтного разреза западной окраины Южно-Американской плиты (ЮАП) 22°–23° ю.ш. *1* – центр ротации ЮАП; *2* – направление вращения; *3* – область моделирования напряженно-деформированного состояния западной окраины ЮАП

няя мантия в направлении к Атлантическому океану до 50 км [10, 11]. Предполагаемая асимметрия разреза подошвы литосферы Южно-Американской плиты дает возможность задать соотношение действующих сил изостатического выравнивания, в предположении дифференциации скоростей кристаллизации мантийного расплава на границе литосфера–верхняя мантия. За условную (безразмерную) единицу принимается величина силы, действующая на элементарную горизонтальную площадку на глубине 50 км и равная нулю на глубине ~200 км (см. рис. 6).

В рамках этой модели полагаем, что на востоке океаническая литосфера изостатически всплывает, вызывая поворот плиты вокруг неподвижного центра тяжести *O* за счет дисбаланса подъемных сил, обусловленного асимметрией сечения упруго-изотропной литосферы в широтном направлении. При этом центр тяжести *O* неподвижен в системе координат *YOX*, то есть подъемные силы вызывают поворот против часовой стрелки массы плиты, при этом вес плиты препятствует перемещению закрепленного центра тяжести. Предметом анализа является напряженно-деформированное состояние фрагмента литосферы, в пределах прямоугольника со сторонами A, B, C, D, переходной зоны континент–океан (см. рис. 6).

В основу модели также заложены данные пространственной локализации очагов фоновых землетрясений, а именно – широтные разрезы с нанесенными гипоцентрами, подобными разрезу, представленному на рис. 2.

Пространственное положение очагов фоновых землетрясений $M \le 4$ дает основание предполагать, что разрез хрупкой литосферы переходной зоны континент–океан может быть представлен в виде модели от нижней границы океанической литосферы на глубине ~50 км с последующим переходом в континентальную литосферу с погружающейся западной окраиной плиты по границе континент–океан в восточном направлении под углом $\angle \sim 30°–40°$ (см. рис. 2, см. рис. 3).

Предполагается, что различие скоростей кристаллизации мантийных расплавов на глубине 50 км и выше приводит к повороту плиты за счет изостатического выравнивания. Мы провели моделирование напряженно-деформированного состояния фрагмента упругой литосферы в пределах прямоугольника со сторонами, обозначенными A–B–C–D, в условиях плоской деформации, возникающее за счет крутящего момента с закрепленной горизонтальной осью (см. рис. 6).

Для расчета напряженно-деформированного состояния до и после землетрясения Маули мы использовали программное обеспечение Comsol Multiphysics [15], реализующее метод конечных элементов. Предметом анализа является напряженно-деформированное состояние литосферы в переходной зоне континент–океан, включающее распределение интенсивности напряжений σ_i компонент σ_{xx}, σ_{xy} и смещений U_{yy}, U_{xx}. При этом интенсивность напряжений:

$$\sigma_i = \left(\sigma_{yy}^2 + \sigma_{xx}^2 - \sigma_{yy}\sigma_{xx} + 3\sigma_{xy}^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

является мерой концентрации упругой потенциальной энергии:

$$U = \frac{1+\mu}{3E_i}\sigma_i^2, \quad (2)$$

где E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона.

Представлен широтный разрез интенсивности напряжений σ_i в литосфере переходной зоны, выраженной в относительных единицах, в предположении, что упругий модуль области литосферы под океаническим желобом существенно ниже, за счет предшествующей диспергации геологической среды в процессе его образования и погружению океанической литосферы восточнее желоба препятствует давление верхней мантии [26] (рис. 7, а).

Выделяются зоны высокой интенсивности напряжений, т.е. зоны высокой концентрации упругой потенциальной энергии тектонических напряжений в рамках принятой модели (см. рис. 7). Предполагаем, что в этих зонах развитие сейсмотектонического процесса, в том числе криповой диспергации геологической среды, происходит более интенсивно.

Если предположить, что зоны высокой интенсивности напряжений одновременно являются областями максимальных октаэдрических напряжений сдвига, можно допустить, что они являются причиной, как фоновой сейсмичности, так и сильных землетрясений западной окраины Южно-Американской плиты. Локализация гипоцентров фоновой сейсмичности соответствует этой зоне (см. рис. 3). Сильнейшие землетрясения $M > 7.7$ расположены в области перехода нижней границы литосферы от океанической к континентальной литосфере.

В обобщенном разрезе нормированным положением оси глубоководного желоба, т.е. удаленностью эпицентров от оси желоба, гипоцентры сильных землетрясений попадают в эту зоны высокой интенсивности напряжений – в область перехода океанической в континентальную литосферу, включая гипоцентр землетрясения Маули (см. рис. 7, а). В этой зоне находятся гипоцентры последних сильнейших землетрясений в этом районе (см. рис. 7, б–г).

ТЕКТОНИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

В нашей модели представлены распределения напряжений σ_{xx}, σ_{xy} в обобщенном широтном разрезе литосферы западной окраины Южно-Американской плиты (рис. 8).

Горизонтальные напряжения сжатия локализованы в верхней части континентальной литосферы, захватывая глубины до 30–40 км и достигая максимальных значений в диапазоне глубин 0–25 км (см. рис. 8, а). Максимальные напряжения горизонтального сжатия σ_{xx} в верхней части континентальной земной коры дают также основание предположить, что они ответственны за формирование складчатости и образование протяженного горного пояса Анд.

В погружающейся литосфере под континентом возникают напряжения растяжения, способствующие образованию трещин раскрытия, стимулирующие проникновение в них мантийных расплавов, достигающих поверхности (см. рис. 8, зона, обозначенная желтым). Одновременно напряжения сдвига σ_{xy} являются причиной развития фоновой сейсмичности, включая сильные тектонические землетрясения $M > 7.7$ (см. рис. 8, б).

Очаг землетрясения Маули, при глубине 33 км, попадает в область относительно высоких значений напряжений сжатия и положительных максимальных напряжений сдвига. По сейсмологическим данным, механизм очага является взбросо-сдвигом, что позволяет выбрать одну из двух возможных нодальных плоскостей разрыва [20, 21] (см. рис. 3).

Как показывают модели напряженно-деформированного состояния эпицентральных зон сильных коровых землетрясений разрыв распространяется через зоны высокой интенсивности напряжений, вызывая в этих зонах максимальные смещения берегов разрыва [8, 26]. Этим зонам соответствуют и очаги сильнейших афтершоков, в коротком интервале времени зарегистрированные после главного толчка. Спустя 12 суток после главного толчка землетрясения было зарегистрировано два сильных афтершока с магнитудами $M = 6.9$ и $M = 7.0$, пространственное положение плоскостей разрывов уверенно определено с использованием сейсмологических данных [20, 32, 33]. Наклон двух плоскостей разрывов протяженностью по горизонтали ~40 км и по вертикали ~30 км составляет угол $\llcorner \sim 60°–70°$ (рис. 9).

При этом механизм очагов этих афтершоков соответствует механизму главного толчка землетрясения (см. рис. 9).

Эти землетрясения имеют собственные афтершоки. Если вынести гипоцентры этих афтершоков на разрезы предполагаемого строения литосферы, то следует предположить, что они попадают в зону высокой концентрации напряжений, вызывающей разрыв литосферы в наклонных плоскостях в ориентированных с горизонтом под углом $\llcorner \sim 70°$, т.е. разрыв главного толчка распространялся к поверхности под углом $\llcorner \sim 70°$ как сильных афтершоков $M \geq 7$ [33] (см. рис. 9, б).

Полученные данные подтверждают предложенную модель сейсмотектонического разрыва землетрясения Маули. В результате взбросо-сдвига океаническая литосфера поднимается, а континентальная литосфера восточнее этой зоны опускается в косейсмическом процессе образования сейсмического разрыва.

В этом случае модель объясняет причину поднятия океанического дна и опускания прибрежной депрессии. Опускание континента сопровождается смещением поверхности в западном направлении, регистрируемое сетью станций GPS наблюдений (см. рис. 4). Резкое поднятие океанического дна при распространении разрыва, достигающего максимума в прибрежной полосе, вызывает цунами [37].

После главного толчка землетрясения Маули за период с 15.03.2010 г. по 24.05.2010 г. было зарегистрировано более 7300 афтершоков. Если предположить, что образовавшийся разрыв вспарывает протяженную зону разлома Атакама, то следует ожидать изменения физико-механических свойств геологической среды, на которую повлияло это событие – тектоническая диспергация и, соответственно, произошло снижение упругих свойств в пределах разломной зоны (рис. 10).

Принимая условно снижение упругого модуля в этой области на порядок, приведены результаты расчетов σ_{xx} и τ_{xy} в рамках предлагаемой модели

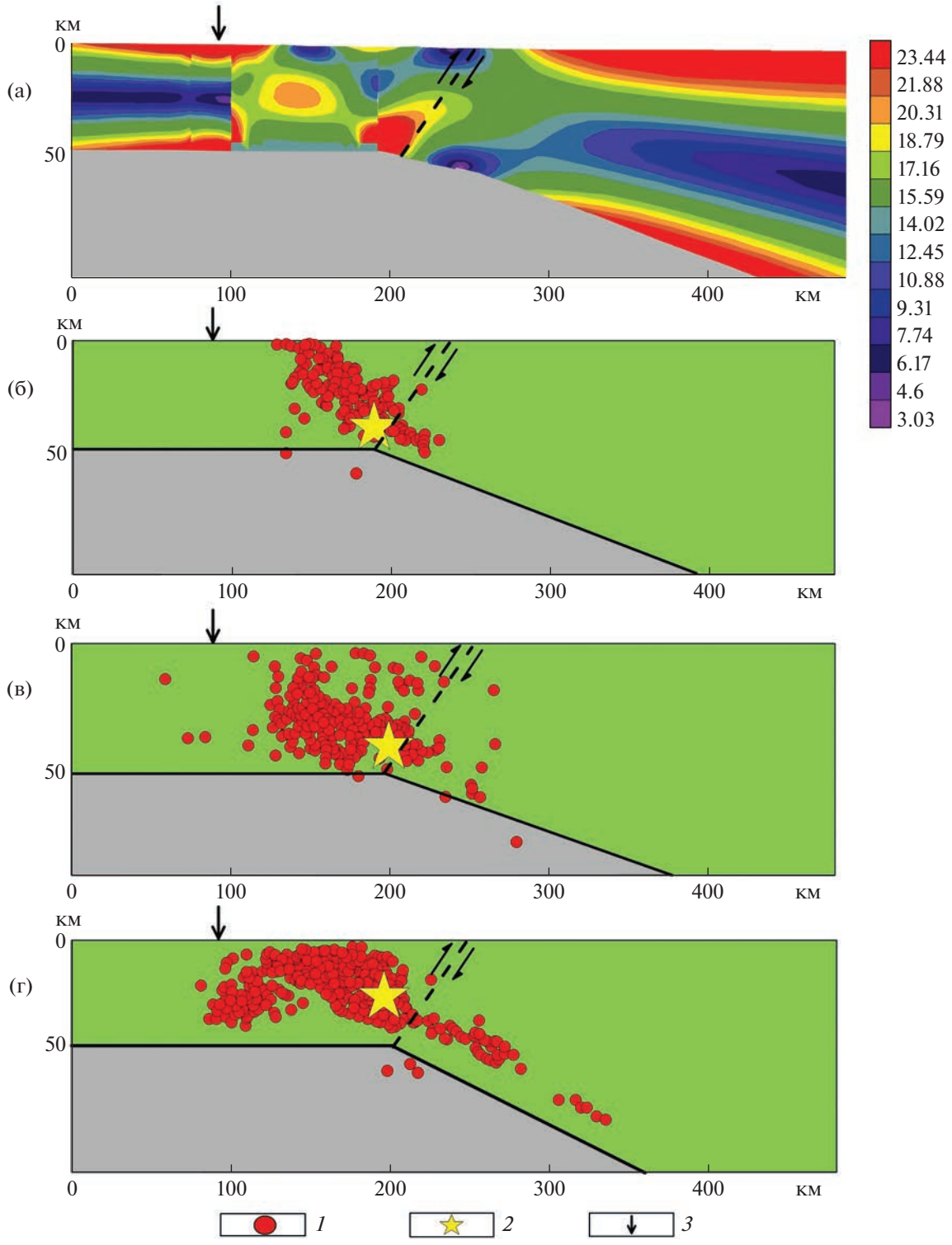


Рис. 7. Интенсивность напряжений в переходной зоне континент–океан и афтершоки сильных землетрясений в Чили (с использованием данных [18, 19, 31]).
(а) – интенсивность напряжений в земной коре до землетрясения Маули;
(б)–(г) – афтершоки землетрясения: (б) – Антофагаста 30.07.1995 г. (M = 8.0), (в) –Токопилла 14.10.2007 г. (M = 7.7), (г) – Маули 27.02.2010 г. (M = 8.8).
1 – афтершоки; *2* – главный толчок; *3* – положение оси глубоководного желоба

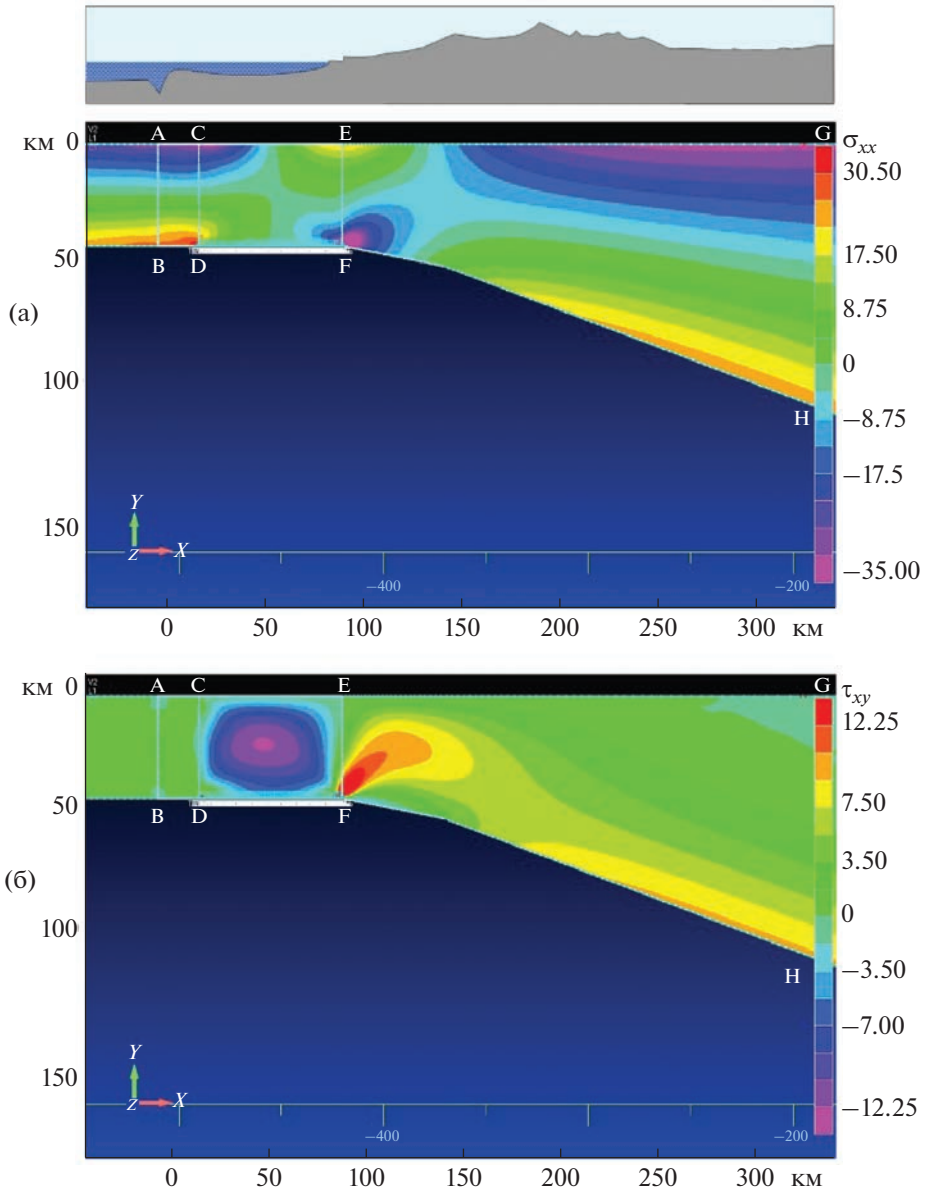


Рис. 8. Напряжения сжатия и растяжений σ_{xx} (а) и сдвига σ_{xy} (б) в переходной зоне континент–океан.

литосферы (см. рис. 10). Показано, что напряжения сжатия σ_{xx} в земной коре западнее разрыва снижаются, при этом напряжения сдвига τ_{xy} западнее разрыва возрастают и соответствуют зоне развития интенсивного афтершокового процесса в океанической литосфере.

Таким образом, механическое ослабление зоны контакта между океанической и континентальной литосферой, приводит к погружению континентальной литосферы и подъему океанической в рамках предлагаемой модели литосферы Южно-Американской плиты, что соответствует имеющимся экспериментальным данным.

Активизация афтершокового процесса в океанической литосфере характерна для сильных землетрясений 30.07.1995 г. M = 8.0 и 14.07.2007 г. M = 7.7. Афтершоки первой фазы локализуются в области океанической литосферы, в виде облака, которое не отражается в субдукционной модели погружающейся океанической коры (см. рис. 7, а).

Изменение гравитационного поля вдоль профиля широтной ориентации дает основание предположить, что отрицательная область гравитационной аномалии связана с погружением континентальной литосферы, в том числе за пределами эпицентральной зоны землетрясения Маули (см. рис. 1, б). При этом положительная аномалия воз-

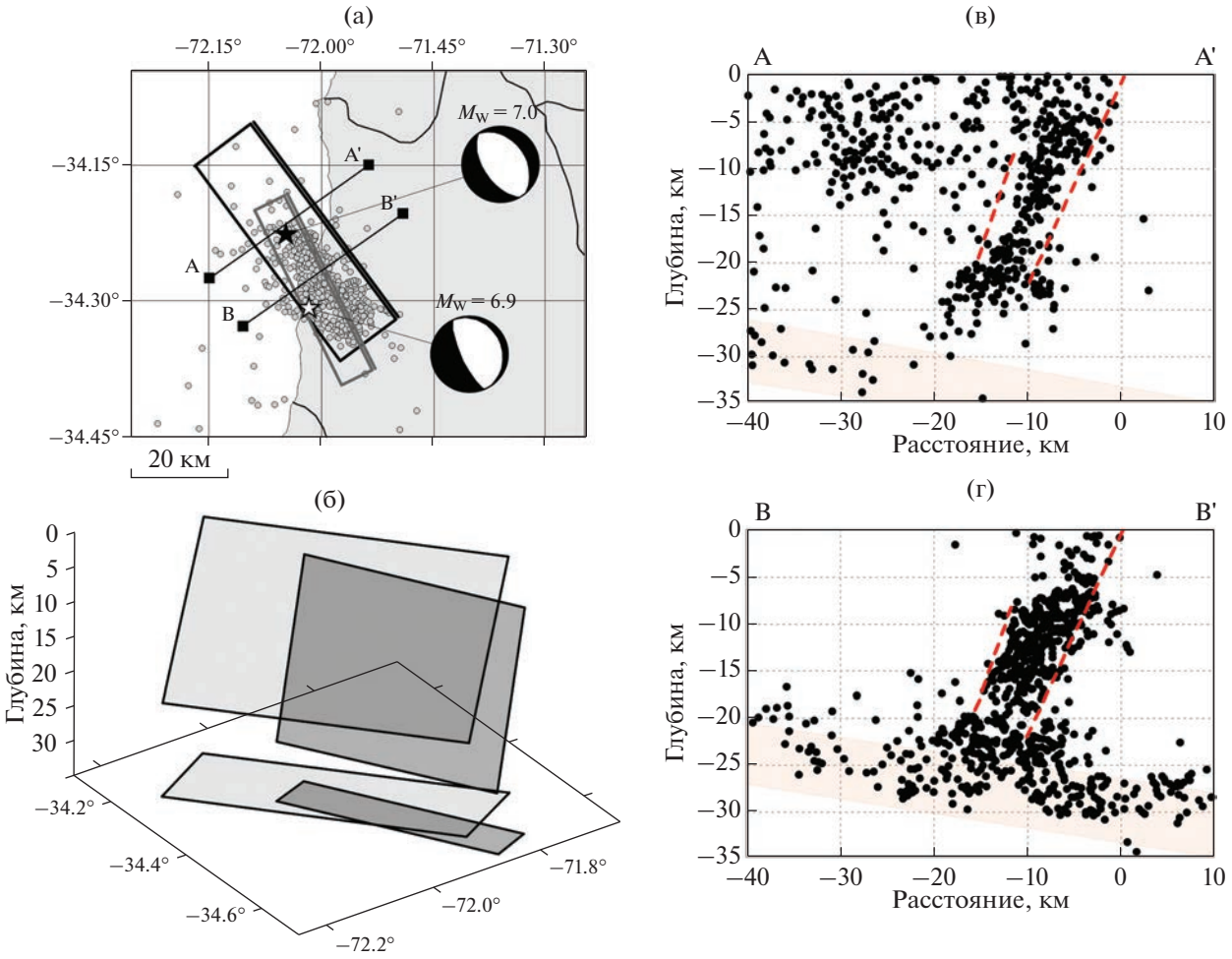


Рис. 9. Сейсмичность и положение сейсмических разрывов сильных афтершоков (M_w = 7.0 и M_w = 6.9) землетрясения Маули 11 марта 2010 г.
(а)–(б) – положение в плане и объемные модели разрывов сильных афтершоков (по [32]); (в)–(г) – сейсмичность профилей вкрест Чилийского желоба (по [33]).
Показано: граница разлома Атакама (пунктир красным); сейсмичность опускающейся плиты Наска (полосы оранжевым).

можно связана с поднятием океанического дна в результате образования взброса западного крыла сформировавшегося разрыва.

В течение шести лет после землетрясения область побережья южнее эпицентра землетрясения продолжает опускаться, в то время как территория вулканического пояса испытывает поднятие, достигающее 10 см [29]. При этом горизонтальные смещения поверхности в прибрежной полосе значительно превышают смещения западной периферии.

В результате проявление этих деформаций подтверждает, что они вызваны землетрясением Маули и являются его следствием.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассматривая землетрясение Маули как масштабное проявление сейсмотектонического процесса западной окраины Южно-Американской плиты, представим обобщающую модель литосферы этого района в виде широтного разреза, условно соответствующего 35° ю.ш. в пределах 75° и 65° в.д. (рис. 11).

Восточнее оси глубоководного желоба, в интервале ⌊73°–72° граница океанической литосферы на глубине ~50 км переходит в погружающуюся границу континентальной литосферы. Зона контакта океанической литосферы с континентальной представляет собой область сильных тектонических землетрясений прибрежной территории Чили (см. рис. 11). В этой области очаги сильных землетрясений локализованы в интервале глубин 20–50 км, формируя разломную зону Атакама, хорошо выраженную в прибрежной тектонике Чилийского сектора Южно-Американской плиты [4, 5, 9, 24, 25].

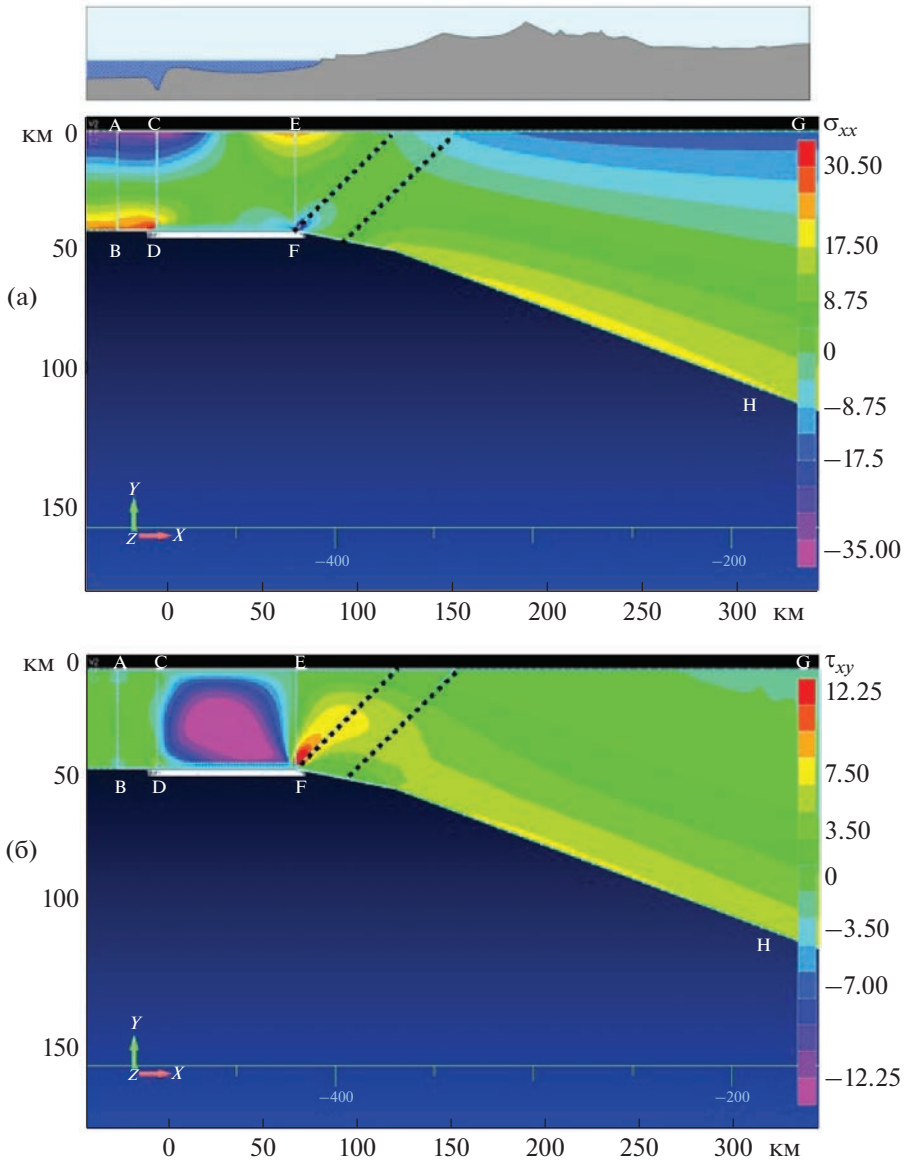


Рис. 10. Напряжения сжатия σ_{xx} (а) и сдвига σ_{xy} (б) в переходной зоне континент–океан после землетрясения.

На тестовой модели напряженно-деформированного состояния Южно-Американской плиты показана концентрация напряжений сжатия в верхней части континентальной литосферы, выше границы Мохоровича (см. рис. 10). Концентрация напряжений сжатия в этой области дает логичное объяснение очагов коровых землетрясений и фоновой сейсмичности. Напряжения сжатия, вероятно, захватывающие интервал глубин земной коры ~30 км, отвечают за образование горной системы Анд. На фоне общего четвертичного опускания прибрежной депрессии напряжения сжатия образуют тектонические линзы выпирания, формирующие горные массивы Анд [5].

Сильные землетрясения вызваны высокой концентрацией тектонических напряжений в области перехода от океанической к континентальной литосфере (см. рис. 8). В этой зоне возникают очаги сильных землетрясений в интервале глубин от 20 до 50 км с разрывами, распространяющимися по латерали на ≥500 км вдоль западного побережья Чили. В совокупности они формируют разлом в литосфере с углом падения ∟65°–80° в пределах Чилийского сектора Южно-Американской плиты, повторяющий очертание береговой полосы ее западной окраины. При этом подъемные силы изостатического выравнивания при сильных землетрясениях вызывают резкое поднятие океанической литосферы и опускание литосферы

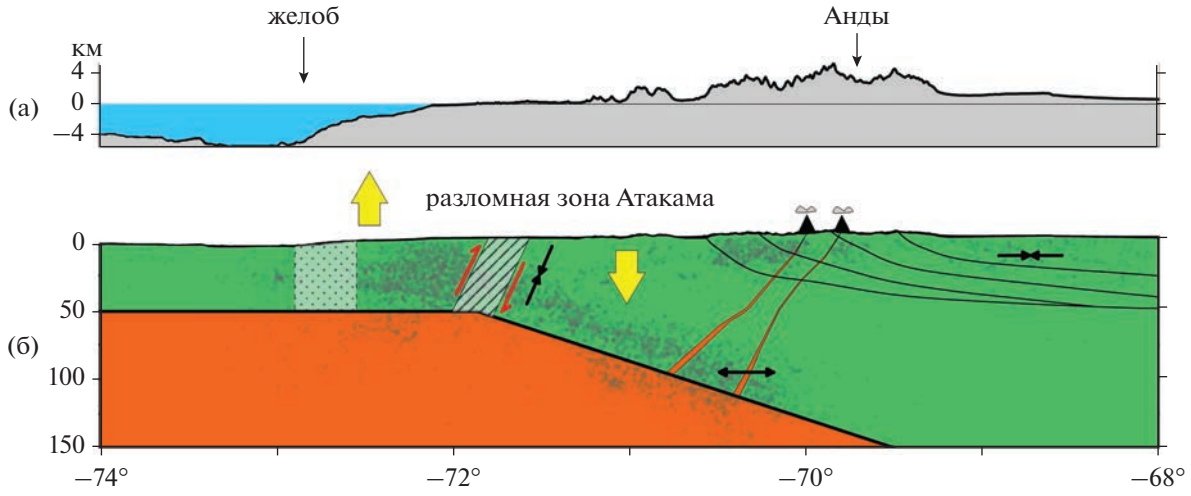


Рис. 11. Модель строения литосферы в переходной зоне континент–океан западной окраины Южно-Американской плиты (Чилийский сектор).

восточнее разлома. Поднятие литосферы вдоль береговой полосы вызывает формирование террас на западном побережье Чили, вызывая цунами [3–5, 37].

При великом землетрясении 22 мая 1960 г. $M = 9.5$ разрыв распространился в южном направлении от эпицентра главного толчка 39°30′ ю.ш. и 74°30′ з.д., в результате на протяжении 700–800 км берег опустился на 1–5 метров [7]. Через два дня после землетрясения началось извержение вулкана Пуйеуэ. По-видимому, следует допустить, что повторное извержение вулкана Пуйеуэ произошло 05.06.2011 г. после землетрясения Мауле неслучайно. Сильные землетрясения вызывают вулканическую активность действующих вулканов, как это неоднократно отмечалось и в других районах земного шара [2, 7].

Нами было сделано предположение, что растягивающие напряжения в приграничной зоне погружающейся границы континентальной литосферы стимулируют развитие крупных трещин на глубине ~100 км, распространяющихся к дневной поверхности [7, 26] (см. рис. 11). Под давлением легкие мантийные расплавы устремляются в эти трещины, стимулируя их развитие и последующее продвижение магмы к поверхности с образованием периферических вулканических очагов. В рамках предложенной нами модели литосферы и напряженно-деформированного состояния после сильных землетрясений разрывы ослабляют контакт между океанической и континентальной литосферой. Резкое погружение континентальной литосферы в мантию вызывает возрастание давления вязкого расплава, способствует проникновению в трещины и подъему к поверхности, вызывая последующие вулканические извержения.

ВЫВОДЫ

Рассматривая в нашей численной модели эпицентральную область землетрясения Маули 2010 г. $M_w = 8.8$ как масштабный фрагмент современного сейсмотектонического процесса западной окраины Южно-Американской плиты, косейсмические и постсейсмические проявления данного землетрясения, мы пришли к следующим выводам.

1. В численной модели литосферы Южно-Американской плиты (ЮАП), используя приведенные сейсмологические данные, мы допускаем возможность ротационного момента ЮАП как причину эпейрогенического процесса, вызывающего геосинклинальный прогиб переходной зоны континент–океан на западной окраине плиты и изостатическое поднятие океанической литосферы, и предполагаем образование протяженного разлома до глубины ~50 км.

2. Особенность строения литосферы в переходной зоне континент–океан (в Чилийском секторе Южно-Американской плиты) привели к формированию разлома Атакама, который образовал контакт с континентальной литосферой, нижняя граница которой погружается в мантию. В области контакта океанической и континентальной литосферы возникают тангенциальные напряжения, вызывающие сильные землетрясения, как землетрясение Маули, сопровождающиеся протяженными разрывами вдоль границы и в совокупности формирующими разлом вдоль западного побережья Южно-Американской плиты. Под разрывом землетрясения Маули мы понимаем протяженную зону длиной ~ 500 км и шириной ~50–80 км со средним углом падения $\angle \sim 70°–80°$. Полагая, что движущей силой эпейрогенического процесса является непрерывный процесс кристаллизации мантийных расплавов в результате

остывания Земли, приводящий к постоянному нарастанию тектонических напряжений, вызывающих сильные землетрясения, которые сопровождаются протяженными взбросо-сдвигами в районе Чилийских Анд.

3. При землетрясении Маули в Чили окраина континентальной литосферы опустилась, одновременно океаническая литосфера поднялась. Причем сильнейшие гипоцентры афтершоков землетрясения Маули локализованы, в пределах зоны разлома Атакама и характеризуют высокий уровень концентрации тектонических напряжений предшествующих разрыву.

4. Процесс аккумуляции тектонических напряжений в эпицентральной зоне землетрясения Маули, по крайней мере с 1939 г., сопровождался упрочением зоны разлома с последующей разрядкой после землетрясения Маули. Образовавшийся разрыв в результате землетрясения Маули и зона его влияния образовали временную переходную зону между континентальной и океанической литосферой. Это привело к перераспределению напряжений, затем – к возрастанию напряжений сдвига в океанической литосфере, сопровождавшихся многочисленными афтершоками $M \leq 4$, одновременно происходила разрядка напряжения сжатия в верхней части континентальной литосферы до глубин ~25 км, т.е. под вулканическим поясом. Вулканические постройки испытали опускание. Мы предполагаем, что это связано с раскрытием трещин в условиях растяжения и излиянием расплавленной, сопровождаемой газами, магмы. Этот процесс вызывает отток магмы из периферических очагов, уменьшение их объемов с последующим оседанием вулканической постройки.

5. Таким образом, представленная численная модель литосферы западной окраины Южно-Американской плиты, в сочетании с тестовой моделью напряженно-деформированного состояния до и после сильных землетрясений в регионе исследования, дают непротиворечивую картину возможного развития сейсмотектонического процесса, в рамках динамического взаимодействия хрупкой литосферы Земли.

Благодарности. Авторы выражают благодарность И.В. Лосеву (ГЦ РАН, г. Москва, Россия), за помощь при подготовке материала статьи. Авторы благодарят ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” Геофизического центра РАН (г. Москва, Россия) за предоставленные оборудование. Авторы признательны анонимным рецензентам за комментарии и редактору за тщательное редактирование.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России (№ 075-01349-23-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ломизе М.Г.* Анды как периферический ороген распадающейся Пангеи // Геотектоника. 2008. № 3. С. 51–72.
2. *Ломизе М.Г.* Арауканский вулканический пояс (Анды) // Докл. АН СССР. 1973. Т. 213. № 5. С. 1147–1150.
3. *Ломизе М.Г.* Донеогеновый вулканизм и тектоника Чилийско-Аргентинских Анд // Геодинамические исследования. 1975. № 2. С. 5–75.
4. *Ломизе М.Г.* Тектонические развитие и вулканизм Чилийско-Аргентинских Анд // Бюлл. МОИП. Геология. 1975. Т. 2. № 3. С. 48–69.
5. *Милановский Е.Е.* Кайнозойский орогенез Центральных Анд // Геодинамические исследования. 1975. № 2. С. 76–161.
6. *Михайлов В.О., Тимошкина Е.П., Смирнов В.Б., Хайретдинов С.А., Дмитриев П.Н.* К вопросу о природе постсейсмических деформационных процессов в районе землетрясения Маули, Чили, 27.02.2010 г. // Физика Земли. 2020. № 6. С. 38–47. https://doi.org/10.31857/S0002333720060046
7. *Морозов В.Н.* Глобальный тектогенез. Основные черты. – М.: ГЕОС, 1999. 169 с.
8. *Морозов В.Н., Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Колесников И.Ю., Маневич А.И., Мельников А.Ю.* Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и результаты GPS-мониторинга эпицентральной зоны землетрясения 24 августа 2014 (г. Напа, шт. Калифорния, США) // Геотектоника. 2018. № 5. С. 90–102. https://doi.org/10.1134/S0016853X18040069
9. *Пущаровский Ю.М., Архипов И.В.* Тектонические аспекты Чилийских Анд // Геотектоника. 1972. № 1. С. 88–104.
10. *Романюк Т.В.* Позднекайнозойская геодинамическая эволюция центрального сегмента Андийской субдукционной зоны // Геотектоника. 2009. № 4. С. 63–83.
11. *Романюк Т.В., Ребецкий Ю.Л.* Плотностные неоднородности, тектоника и напряжения Андийской субдукционной зоны на 21° ю.ш. – Ст.I. – Геофизическая модель и тектоника // Физика Земли. 2001. № 2. С. 23–35.
12. *Романюк Т.В., Ребецкий Ю.Л.* Плотностные неоднородности, тектоника и напряжения Андийской субдукционной зоны на 21° ю.ш. – Ст. II. – Тектонофизическая модель // Физика Земли. 2001. № 2. С. 36–57.
13. *Barrientos S., Vera E., Alvarado P., Monfret T.* Crustal seismicity in Central Chile // J. South Am. Earth Sci. 2004. Vol. 16. Is. 8. P. 759–768. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2003.12.001
14. *Beck S., Barrientos S., Kausel E., Reyes M.* Source characteristics of historical earthquakes along the Central Chile subduction zone // J. South Am. Earth Sci. 1998. Vol. 11. No. 2. P. 115–129. https://doi.org/10.1016/S0895-9811(98)00005-4
15. Comsol Multiphysics. – URL: https://www.comsol.com/ [Accessed: 25.01.2023].

16. *Conrad C. P., Lithgow-Bertelloni C.* Influence of continental roots and asthenosphere on plate-mantle coupling // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33. Is. 5. L05312 https://doi.org/10.1029/2005gl025621

17. *Cowan H., Beattie G., Hill K., Evans N., McGhie C., Gibson G., Lawrance G., Hamilton J., Allan P., Bryant M., Davis M., Hyland C., Oyarzo-Vera C., Quintana-Gallo P., Smith P.* The M8.8 Chile earthquake, 27 February 2010 // Bull. New Zealand Soc. Earthquake Engineer. Vol. 44. Is. 3. P. 123–166. https://doi.org/10.5459/bnzsee.44.3.123-166

18. *Delouis B., Monfret T., Dorbath L., Pardo M., Rivera L., Comte D., Haessler H., Caminade J.P., Ponce L., Kausel E., Cisternas A.* The M_w = 8.0 Antofagasta (Northern Chile) Earthquake of 30 July 1995: A Precursor to the End of the Large 1877 Gap // Bull. Seism. Soc. Am. 1997. Vol. 87. No. 2. P. 427–445. https://doi.org/10.1785/BSSA0870020427

19. *Delouis B., Pardo M., Legrand D., Monfret T.* The Mw 7.7 Tocopilla Earthquake of 14 November 2007 at the Southern Edge of the Northern Chile Seismic Gap: Rupture in the Deep Part of the Coupled Plate Interface // Bull. Seism. Soc. Am. 2009. Vol. 99. No. 1. P. 87–94. https://doi.org/10.1785/0120080192

20. *Duputel Z., Rivera L., Kanamori H., Hayes G.* W phase source inversion for moderate to large earthquakes (1990–2010) // Geophys. J. Int. 2012. Vol. 189. Is. 2. P. 1125–1147. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05419.x

21. Earthquake Hazards Program USGS. M = 8.8 – 36 km WNW of Quirihue, Chile. – URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official20100227063411530_30/executive [Accessed: 25.01.2023].

22. *Gavin P.H., Bergman E., Johnson K.L., Benz H.M., Brown L., Meltzer A.S.* Seismotectonic framework of the 2010 February 27, M_w = 8.8 Maule, Chile earthquake sequence // Geophys. J. Int. 2013. Vol. 195. Is. 2. P. 1034–1051. https://doi.org/10.1093/gji/ggt238

23. *Grossi P., Williams C., Cabrera C., Tabucchi T., Sarabandi P., Rodriguez A., Aslani H., Rahnama M.* The 2010 Maule, Chile earthquake: Lessons and future challenges. – Ed.by M. Rahnama, (Risk Management Solutions, USA. 2011), 41 p.

24. *Kley J., Monaldi C.R.* Tectonic shortening and crustal thickness in the Central Andes: How good is the correlation? // Geology. 1998. Vol. 26. Is. 8. P. 723–726.

25. *Moreno T., Gibbons W.* The Geology of Chile. – Ed. by B. Pankhurst, (Geol. Soc., London. UK. 2007), 395 p.

26. *Morozov V.N., Tatarinov V.N., Kagan A.I.* Seismotectonic model of the western margin of the South American Plate. – In: *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere*. – Springer. *Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering*, (Springer. 2021), P. 469–479. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63571-8_28

27. *Pararas-Carayannis G.* The earthquake and tsunami of 27 February 2010 in Chile – evaluation of source mechanism and of near and far-field tsunami effects // Sci. Tsunami Hazards. 2010. Vol. 29. No. 2. P. 96–126.

28. *Pardo M., Comte D., Monfret T.* Seismotectonic and stress distribution in the Central Chile subduction zone // J. South Am. Earth Sci. 2002. Vol. 15. Is. 1. P. 11–22. https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00003-2

29. *Pritchard M., Jay J., Aron F., Henderson S.T., Lara L.E.* Subsidence at southern Andes volcanoes induced by the 2010 Maule, Chile earthquake // Nature Geoscience. 2013. Vol. 6. P. 632–636. https://doi.org/10.1038/ngeo1855

30. *Qu W., Han Y., Lu Z., An D., Zhang Q., Gao Y.* Co-seismic and post-seismic temporal and spatial gravity changes of the 2010 Mw 8.8 Maule Chile earthquake observed by GRACE and GRACE Follow-on // Remote Sensors. 2020. Vol. 12(17). P. 2768. https://doi.org/10.3390/rs12172768

31. *Rietbrock A., RyderI., Hayes G., Haberland C., Comte D., Roecker S., Lyon-Caen H.* Aftershock seismicity of the 2010 Maule M_w = 8.8, Chile, earthquake: Correlation between co-seismic slip models and aftershock distribution? // Geophys. Res. Lett. 2012. Vol. 39. Is. 8. P. L08310. https://doi.org/10.1029/2012GL051308

32. *Ruiz J.A., Hayes. P.H., Carrizo D., Kanamori H.* Seismological analyses of the 2010 March 11, Pichilemu, Chile, M_w = 7.0 and M_w = 6.9 coastal intraplate earthquakes // Geophys. J. Int. 2014. Vol. 197. Is. 1. P. 414–434. https://doi.org/10.1093/gji/ggt513

33. *Ryder I., Rietbrock A., Kelson K., Bürgmann R., Floyd M., Socquet A., Vigny C., Carrizo D.* Large extensional aftershocks in the continental forearc triggered by the 2010 Maule earthquake, Chile // Geophys. J. Int. 2012. Vol. 188. Is. 3. P. 879–890. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05321.x

34. *Takada Y., Fukushima Y.* Volcanic Subsidence Triggered by Megathrust Earthquakes // J. Disaster Res. 2014. Vol. 9. Is. 3. P. 373–380. https://doi.org/10.20965/jdr.2014.p0373

35. *Takada Y., Fukushima Y.* Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan // Nature Geoscience. 2013. Vol. 6. P. 637–641. https://doi.org/10.1038/ngeo1857

36. *Vigny C., Socquet A., Peyrat S., Ruegg J.-S., Métois M., Madariaga R., Morvan S., Lancieri M., Lacassin R., Campos J., Carrizo D., Bejar-Pizarro M., Barrientos S., Armijo R., Aranda C., Valderas-Bermejo M.-C., Ortega I., Bondoux F., Baize S., Lyon-Caen H., Pavez A., Vilotte J.P., Bevis M., Brooks B., Smalley R., Parra H., Baez J.-C., Blanco M., Cimbaro S., Kendrick E.* The 2010 Mw 8.8 Maule Megathrust Earthquake of Central Chile, Monitored by GPS // Science. 2011. Vol. 332. No. 6036. P. 1417–1421. https://doi.org/10.1126/science.1204132

37. *Yamazaki Y., Cheung K.F.* Shelf resonance and impact of near-field tsunami generated by the 2010 Chile earthquake // Geophys. Res. Lett. 2011. Vol. 38. Is. 12. L12605. https://doi.org/10.1029/2011GL047508

Seismotectonic Consequences of the Strong Earthquake Mauli (February 27, 2010, M_w = 8.8) in Chile: Digital Modeling of the Crust Stress-State of the Western Margin of the South American Plate

V. N. Morozov[a], A. I. Manevich[a, *]

[a]*Geophysical Center RAS, bld. 3, Molodezhnaya st., 119296 Moscow, Russia*

**e-mail: a.manevich@gcras.ru*

This article presents seismotectonic consequences of the strong Mauli earthquake in Chile, which occurred on the February 27, 2010, M_w = 8.8. The consequences are considered as a manifestation of a large-scale fragment of the general seismotectonic process on the western edge of the South American plate (Chilean sector). Our study shows that manifestations of postseismic processes of the Maule earthquake cover a much larger area compared to the epicentral zone of the aftershocks. Based on the comparison of the results of numerical modeling of the stress-strain state before and after the earthquake, seismological, geodetic, and satellite data, an alternative model of the development of the seismotectonic process in the Chilean sector of the South American plate was proposed. The stress-strain modeling was performed by the finite element method. The source of the Mauli earthquake, at a depth of 33 km, falls into the region of relatively high values of compression stresses and positive maximum shear stresses. It was shown, that other strong earthquakes of the Chilean sector in the interval of depths from 20 to 50 km are caused by high concentration of tectonic stresses in the region of transition from oceanic to continental lithosphere. Within the framework of the proposed model of the seismotectonic process, ruptures weaken the contact between the oceanic and continental lithosphere after strong earthquakes. Abrupt sinking of the continental lithosphere into the mantle causes an increase in viscous melt pressure, promotes penetration into mega-cracks, and rises to the surface, causing subsequent volcanic eruptions. It is shown that the results obtained in comparison with the coseismic consequences of earthquakes do not contradict these results of numerical modeling and give new insights into the structure of the lithosphere in the continent–ocean transition zone and the development of the seismotectonic process.

Keywords: Maule earthquake, South American plate, Chile trench, Nazca plate, stress-strain state, fault, numerical modeling