



SEISMOTECTONIC DEFORMATION IN THE CONTACT AREA OF THE NAZCA AND SOUTH AMERICAN LITHOSPHERIC PLATES IN RELATION TO THE FEBRUARY 27, 2010 M_w 8.8 MAULE EARTHQUAKE

P. G. Dyadkov^{1,2}, O. A. Kuchay¹, Yu. M. Romanenko¹

¹*A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

Abstract: Based on the data on earthquake focal mechanisms, we estimated seismotectonic deformation related to the 2010 M_w 8.8 Maule earthquake and analyzed the deformation at different depths. In the main seismic dislocation of the Maule earthquake and the northern area, the deformation field to a depth of 70 km is typical of subduction zones as evidenced by shortening in the direction of the oceanic plate subduction. Below a depth of 70 km, the deformation pattern changes sharply to horizontal stretching. After the main seismic event, as well as before it, near-latitudinal shortening was dominant in the focal zone, while the region of the main seismic dislocations was surrounded by separate areas of near-latitudinal stretching, which is an opposite type of deformation. We conducted a detailed analysis of the seismotectonic deformations in the oceanic uplift area to the west of the deep-water trough and identified local zones of near-latitudinal stretching near the southern and northern boundaries of the future Maule earthquake zone. Detecting such zones can provide important data for early forecasting of regions wherein strong subduction-related earthquakes are being prepared.

Key words: 2010 Maule earthquake; Nazca plate; Chile; seismotectonic deformation; earthquake focal mechanism; aftershock; earthquake preparation

RESEARCH ARTICLE

Recommended by V.A. Sankov

Received: November 7, 2016

Revised: March 16, 2017

Accepted: March 23, 2017

For citation: Dyadkov P.G., Kuchay O.A., Romanenko Yu.M., 2017. Seismotectonic deformation in the contact area of the Nazca and South American lithospheric plates in relation to the February 27, 2010 M_w 8.8 Maule earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (3), 655–671. doi:10.5800/GT-2017-8-3-0311.

Для цитирования: Дядьков П.Г., Кучай О.А., Романенко Ю.М. Сейсмотектонические деформации зоны контакта литосферных плит Наска и Южно-Американской в связи с землетрясением Мауле, $M_w=8.8$, 27.02.2010 г. // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 3. С. 655–671. doi:10.5800/GT-2017-8-3-0311.

СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗОНЫ КОНТАКТА ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ НАСКА И ЮЖНО-АМЕРИКАНСКОЙ В СВЯЗИ С ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ МАУЛЕ, M_w 8.8, 27.02.2010 г.

П. Г. Дядьков^{1,2}, О. А. Кучай¹, Ю. М. Романенко¹

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: На основе данных о механизмах очагов землетрясений выполнен расчет сеймотектонических деформаций для района землетрясения Мауле, $M_w=8.8$, 2010 г. Детально исследованы особенности деформаций на разных глубинах. В районе основной сейсмодислокации землетрясения Мауле и севернее характер поля деформаций до глубин 70 км является обычным для зон субдукции: наблюдается укорочение в направлении погружения океанической плиты. Ниже глубины 70 км характер деформирования резко меняется на горизонтальное удлинение. После главного события, так же как и до него, в очаговой области преобладает близширотное укорочение, но область основных сейсмодислокаций окружена отдельными участками с противоположным типом деформаций – близширотным удлинением. Детальный анализ сеймотектонических деформаций в области океанического поднятия к западу от глубоководного желоба позволил выявить локальные участки близширотного удлинения вблизи южной и северной границы будущей области деструкции землетрясения Мауле. Обнаружение таких участков может иметь важное прогностическое значение для заблаговременного выделения областей подготовки сильных субдукционных землетрясений.

Ключевые слова: землетрясение Мауле 2010 г.; плита Наска; Чили; сеймотектоническая деформация; механизм очага землетрясения; афтершок; подготовка землетрясения

1. ВВЕДЕНИЕ

Одно из сильнейших землетрясений последнего времени произошло 27 февраля 2010 г. ($M_w=8.8$, $\varphi=35.91^\circ$, $\lambda=72.73^\circ$, $H=35$ км) [USGS Earthquake Hazards Program, 2017] в регионе Мауле (Чили) на контакте тектонических плит Наска и Южно-Американской (рис. 1). Это третье по энергии событие из зарегистрированных во время последней глобальной активизации (после Суматра-Андаманского, 2004 г., $M_w=9.2$, и Тохоку, 2011 г., $M_w=9.0$).

После события 27 февраля 2010 г. произошел целый ряд значительных землетрясений и афтершоков вдоль побережья Южной Америки, поэтому в данной статье будут детально исследованы особенности сеймотектонических деформаций (СТД) за период с 1976 г. по 2014 г. и за временные отрезки до и после сильнейшего землетрясения 27 февраля 2010 г. В работе анализируются СТД, полученные по данным механизмов очагов землетрясений с $M_w>4.8$ [Global CMT..., 2017] в районе с координатами $\varphi=17-46^\circ$ ю.ш., $\lambda=65-76^\circ$ з.д. (рис. 2). Бы-

ли рассмотрены сеймотектонические деформации для разных интервалов глубин: 0–35 км, 36–70 км, 71–150 км, 150–300 км.

Ранее анализ механизмов очагов этого региона в связи с землетрясением Мауле выполнялся в работах [Rietbrock et al., 2012; Lange et al., 2012; Rebetsky, Tatevossian, 2013; Ruiz, Contreras-Reyes, 2015]. В работах [Rietbrock et al., 2012; Lange et al., 2012; Ruiz, Contreras-Reyes, 2015] анализировались косейсмические смещения и их связь с интенсивностью афтершокового процесса и механизмами очагов афтершоков. В статье [Rebetsky, 2013] по данным фокальных механизмов восстановлено поле напряжений перед землетрясением в Мауле и показано, что оно является практически однородным с абсолютным преобладанием близширотного сжатия. При этом на региональном уровне, южнее района землетрясения Мауле, наблюдается область с близгоризонтальным растяжением в крест простираения океанического желоба.

В данной работе выполнен расчет сеймотектонических деформаций с использованием наиболее

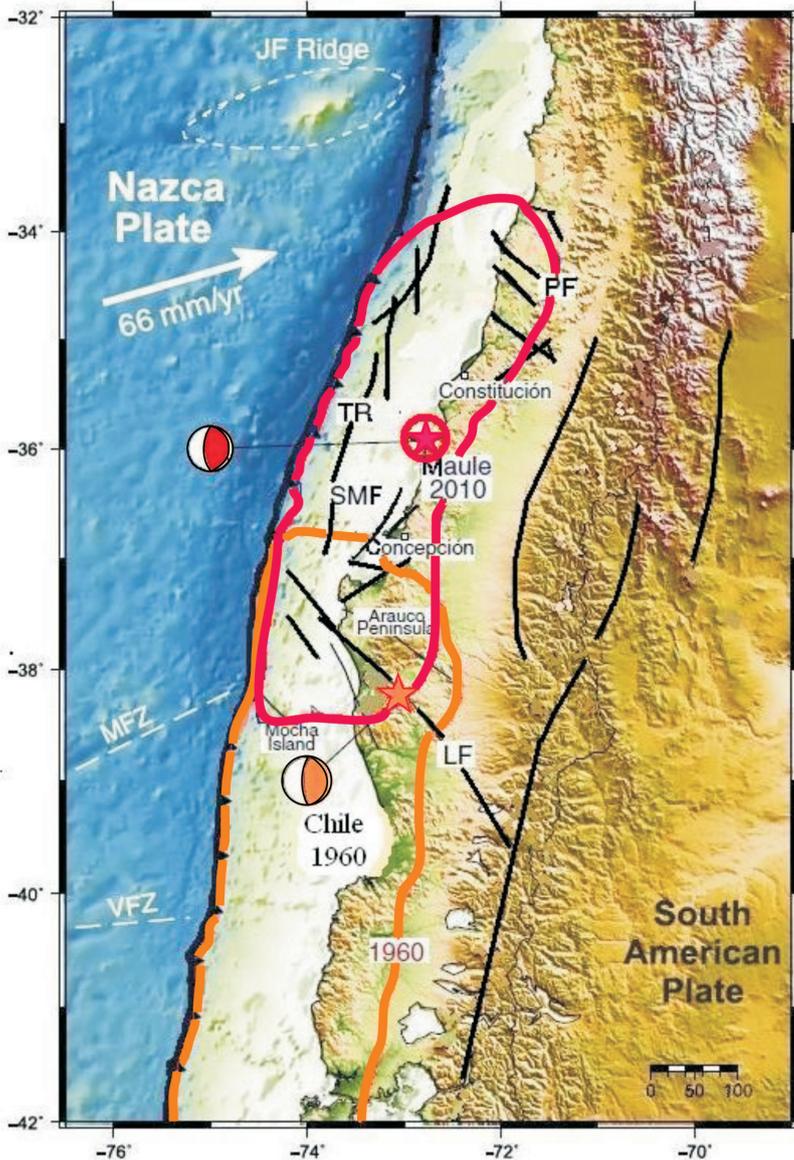


Рис. 1. Сейсмотектоническая схема двух меганадвигов Южного и Центрального Чили ([Moreno et al., 2012], с изменениями).

Зоны дислокаций (>1 м) землетрясений Мауле 2010 г. с $M_w=8.8$ и Чилийского 1960 г. с $M_w=9.5$ контурены толстой красной и оранжевой линиями. Черные линии отмечают главные разломы континентальной плиты: Thrust Ridge (TR), Santa María Fault (SMF), Llanahue Fault (LF), Pichilemu Fault (PF). Белыми пунктирными линиями показаны главные океанические структуры плиты Наска в изучаемом районе, которые включают хребет Хуан Фернандес (Juan Fernández Ridge – JF Ridge), а также разломные зоны Моча (Mocha – MFZ) и Валдивия (Valdivia – VFZ).

Fig. 1. Seismotectonic setting of two megathrust faults in the Southern and Central Chile (modified after [Moreno et al., 2012]).

Lines: thick red and orange – dislocations zones (>1 m) of the 2010 M_w 8.8 Maule and the 1960 M_w 9.5 Chile earthquakes; black – the main faults of the continental plate: Thrust Ridge (TR), Santa María Fault (SMF), Llanahue Fault (LF), and Pichilemu Fault (PF); dashed white – the main oceanic structures of the Nazca plate in the study area: Juan Fernández Ridge (JF), Mocha (MFZ) and Valdivia (VFZ) fault zones.

полных данных о механизмах очагов этого региона, выявлены закономерности и особенности их распределения в связи с подготовкой и реализацией землетрясения Мауле.

2. ОСОБЕННОСТИ ТЕКТОНИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И СЕЙСМИЧНОСТИ ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ МАУЛЕ

Как известно, Анды на западном побережье Южной Америки сформировались как проявление конвергентной границы, отражающей процессы взаимодействия при встречном движении Южно-Американской литосферной плиты и плиты Наска. По материалам GPS океаническая плита Наска движется в восточном-северо-восточном направлении со скоростью 8 см/год, в то время как Южно-Американская плита движется на запад-северо-запад

со скоростью около 1 см/год [Angermann et al., 1999; Métois et al., 2013; Ruegg et al., 2009]. Основная сейсмичность сосредоточена в коре и подкоровом слое до 300 км [Bilek, 2010]. Отдельные землетрясения возникают на глубинах до 600–700 км. Надо отметить, что с глубиной плотность гипоцентров землетрясений с $M_w > 4.8$ убывает. Мощность континентальной коры доходит до 70 км [Bianchi et al., 2013].

В очаге землетрясения Мауле 27 февраля 2010 г. надвиговая подвижка произошла по пологой плоскости [Global CMT..., 2017]. Протяженность очага по горизонтали оценивается в ~ 500 км [Rietbrock et al., 2012]. Большинство землетрясений, зафиксированных как до, так и после главного события, имеют схожий механизм очага. Исключение составляют сильные афтершоки сбросового типа, произошедшие 27 февраля 2010 г. с $M_w=7.4$ на юге и 11 марта 2010 г. с $M_w=7.0$ и $M_w=6.9$ к северо-востоку от главного события.

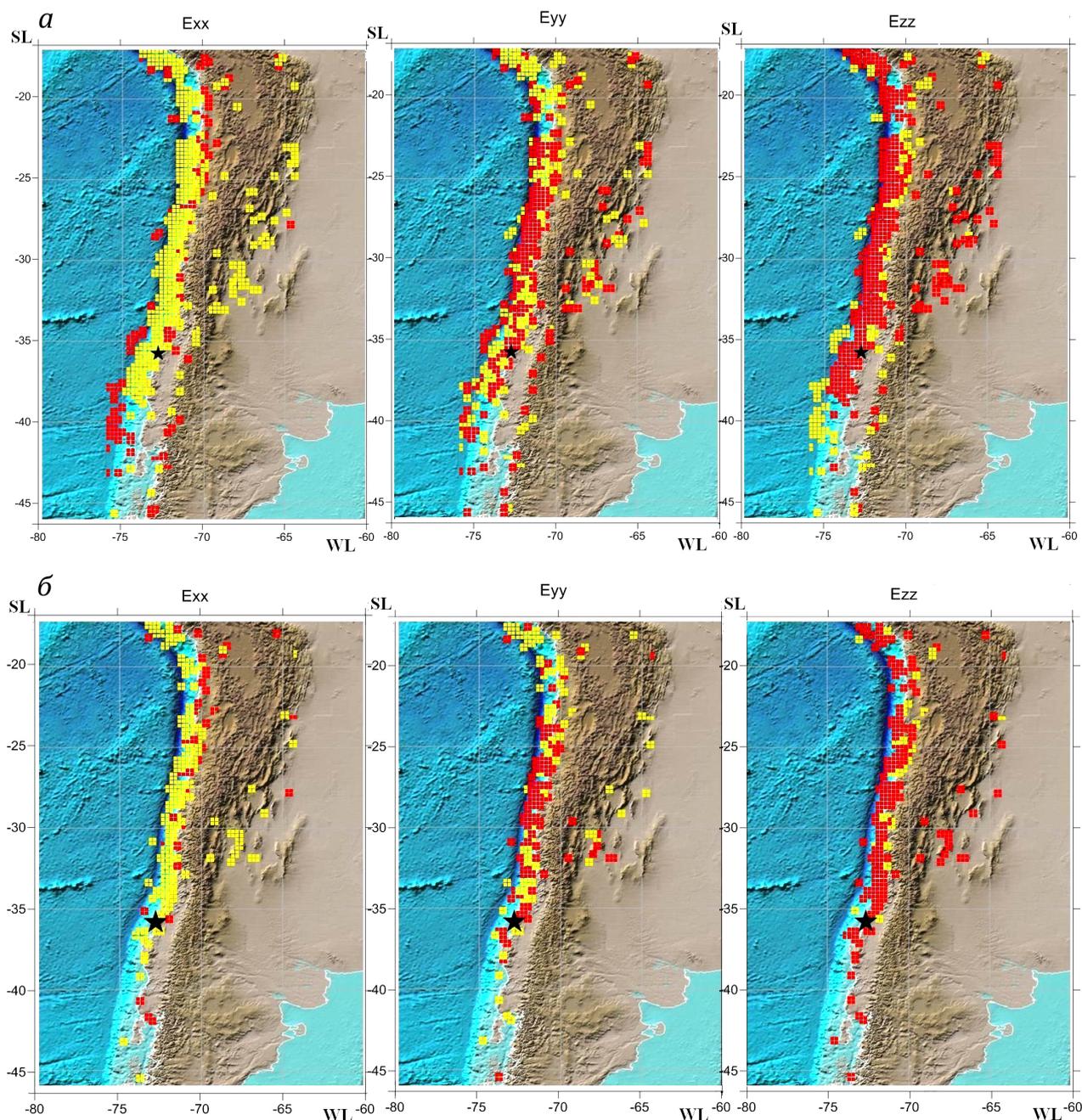


Рис. 2. Поле широтной (E_{xx}), меридиональной (E_{yy}) и вертикальной (E_{zz}) компонент сейсмотектонических деформаций по данным механизмов очагов землетрясений, зарегистрированных за интервал времени 1976–2014 гг. в диапазонах глубин: $H=0-35$ км (*а*), $H=36-70$ км (*б*), $H=71-150$ км (*в*) и $H=151-300$ км (*г*). Желтыми квадратами показаны области укорочения, красными – удлинения в соответствующих направлениях. Звездой черного цвета отмечено местоположение начальной точки вспарывания в очаге землетрясения Мауле 27 февраля 2010 г.

Fig. 2. Latitudinal (E_{xx}), meridional (E_{yy}) and vertical (E_{zz}) components of seismotectonic deformation estimated from the focal mechanisms of earthquakes recorded from 1976 to 2014. Depth ranges: $H=0-35$ km (*a*), $H=36-70$ km (*b*), $H=71-150$ km (*c*), $H=151-300$ km (*d*). Areas in boxes: yellow – shortening, red – stretching; arrows – directions. The black star denotes the initial rupturing point in the 27 February 2010 Maule earthquake source.

Выделим основные особенности тектонического строения, характеризующие область подготовки землетрясения Мауле 2010 г. с $M_w=8.8$.

Во-первых, следует отметить приуроченность северного и южного окончаний зоны дислокаций

(см. рис. 1) и практически совпадающих с ними окончаний области афтершоков (33° и 38.5° ю.ш. – северная и южная границы соответственно) к таким тектоническим структурным элементам, как хребет Хуан Фернандес на севере и разломная зона

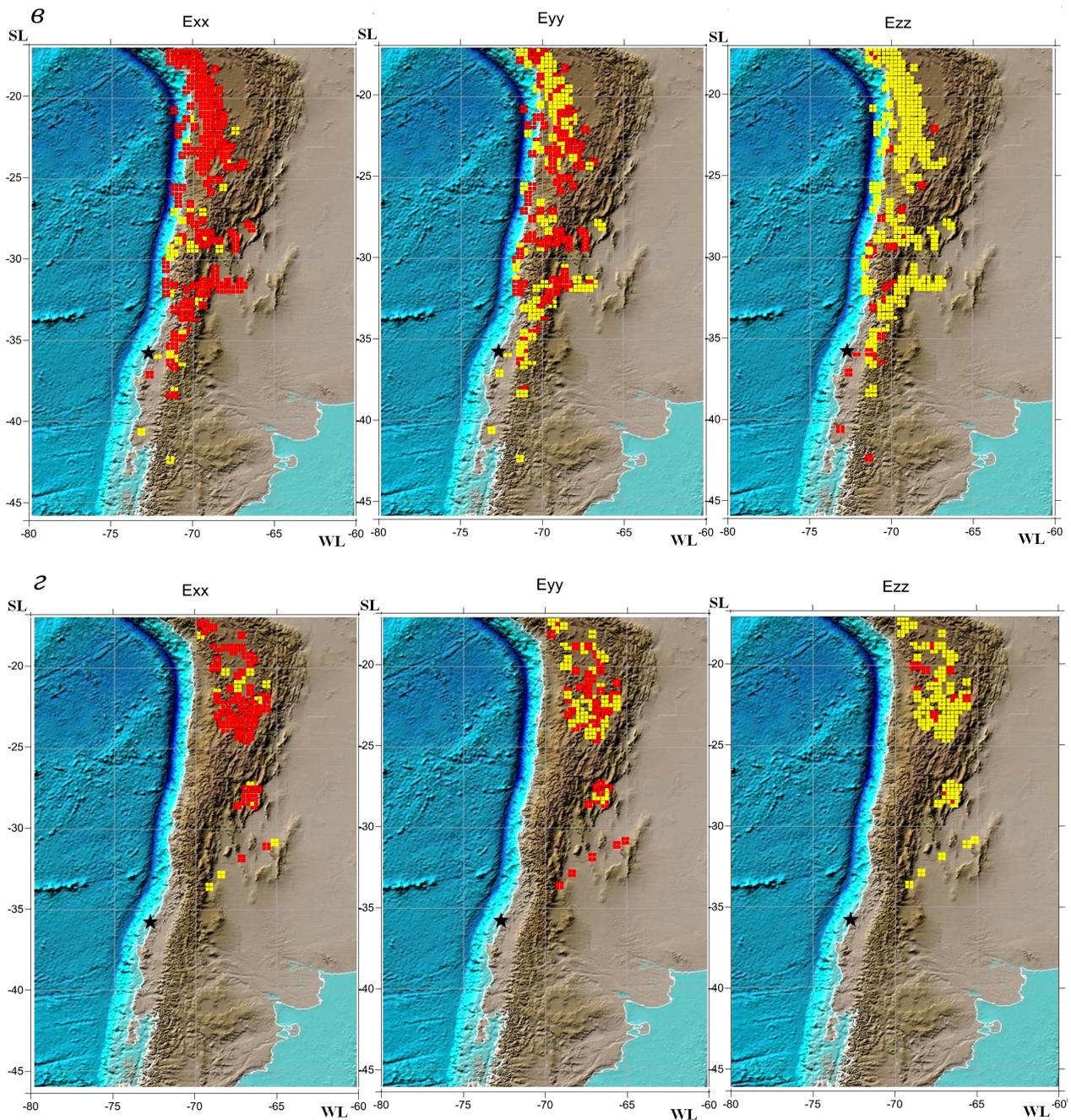


Рис. 2 (окончание).

Fig. 2 (end).

Моча на юге. По-видимому, между этими реологически более слабыми структурами океаническая литосфера достаточно однородна и имеет более высокие упругие и прочностные свойства. То есть можно говорить о тектоническом сегменте земной коры, расположенном между 33-й и 39-й параллелями южной широты, где начиная с 1835 г. не было событий с магнитудой более 8 и где по данным GPS-наблюдений наблюдался дефицит смещений в поддвиге океанической коры под континентальную [Campos et al., 2002; Ruegg et al., 2009]. Эта так

называемая брешь Дарвина, по оценкам Д. Мельник и др. [Melnick et al., 2012], была полностью закрыта землетрясением Мауле в 2010 г.

Во-вторых, следует отметить, что зона основных сейсмодислокаций землетрясения Мауле находится немного западнее области залегания позднепалеозойского батолита [Martin et al., 1999], тогда как северная и южная границы батолита близки как к соответствующим границам зоны дислокаций, так и к области афтершоков [Lange et al., 2012]. Необходимо также отметить, что афтершоковая область

землетрясения Мауле на юге заканчивается на параллели $\sim 38.5\text{--}39.0^\circ$ ю.ш., перед областью наибольших дислокационных смещений Чилийского землетрясения 1960 г., $M_w=9.5$, которые были определены в работе [Moreno et al., 2009].

В-третьих, можно предполагать, что основной структурной неоднородностью в тектоническом строении этого сегмента зоны субдукции, возможно объясняющей столь длительное накопление упругих деформаций в районе сейсмической бреши Дарвина, является обнаруженное на глубине ~ 25 км высокоскоростное поднятие рельефа субдицирующей океанической плиты. Пространственное положение этой структуры, выявленной на основе сейсмотомаграфических исследований [Hicks et al., 2012], совпадает с интенсивной положительной гравитационной аномалией Буге [Tassara, Echaurren, 2012]. Это поднятие могло являться основным «зацепом» между континентальной и погружающейся океанической плитами. Именно вблизи него началось вспарывание разрывов землетрясения Мауле. Важно отметить, что пространственное распределение косейсмических смещений при землетрясении Мауле [Moreno et al., 2012] показывает относительно небольшие смещения, менее 8 м, вблизи этой структурной неоднородности ($\sim 36^\circ$ ю.ш.), тогда как максимумы аномальных смещений располагались севернее, около 35° ю.ш., где достигали 17 м, и южнее, вблизи 37° ю.ш., с амплитудами до 12 м. Такое распределение косейсмических смещений указывает на то, что выявленное поднятие оставалось барьером также и во время землетрясения Мауле, при реализации накопленной упругой энергии в этом сегменте литосферы.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Для расчета сейсмотектонического деформирования объемов горных масс использовалась методика, основанная на работах Ю.В. Ризниченко и Б.В. Кострова [Riznichenko, 1985; Kostrov, 1975]. Кратко остановимся на этой методике. Деформирование объемов земной коры при смещениях частиц среды по разноориентированным разрывам в очагах землетрясений характеризуется средним тензором СТД, равным сумме тензоров сейсмических моментов всех землетрясений, возникших в единице объема за определенный промежуток времени:

$$E_{lm} = \frac{1}{\mu V} \sum_{n=1}^N M_0^{(n)} Q_{lm}^{(n)},$$

где μ – модуль сдвига; V – объем осреднения; $M_0^{(n)}$ – величина сейсмического момента n -го землетрясе-

ния, определяемая по известной корреляционной зависимости [Riznichenko, 1985]; $Q_{lm}^{(n)}$ – компоненты единичного тензора сейсмического момента n -го землетрясения в географической системе координат, выраженные через параметры механизма очага.

Деформация тех участков, где наряду с умеренными землетрясениями возникли и сильные очаги, определяется в основном сильными событиями, поэтому чаще всего сильные землетрясения определяют направление сейсмического течения на региональном уровне, а слабые события – на локальном масштабном уровне.

Расчеты компонент деформаций для ячеек размером $0.5 \times 0.5^\circ$ проводились методом скользящего окна с шагом 0.25° . Были рассмотрены сейсмотектонические деформации для разных диапазонов глубин: 0–35 км (для расчета использовано 805 решений механизмов очагов землетрясений), 36–70 км (244 решения), 71–150 км (432 решения), 150–300 км (198 решений). Решения механизмов очагов землетрясений выбирались из каталогов [Global CMT..., 2017]. Мощность слоя определялась наличием данных о механизмах очагов землетрясений. Исследовались поля вертикальных, меридиональных и широтных компонент сейсмотектонических деформаций, рассчитанных в географической системе координат. При построении карт для нас важным были не сами величины деформаций, а их знак, то есть относительные удлинения и укорочения объемов горных масс. В данной работе было принято, что положительные значения деформаций соответствуют относительному удлинению, отрицательные – относительному укорочению линейных размеров элементарных объемов земной коры в соответствующих направлениях.

4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сейсмотектонические деформации на глубинах 0–35 км. Рассмотрим сначала сейсмотектонические деформации в пределах координат: $\varphi = -17\text{--} -46^\circ$ по широте и $\lambda = -65\text{--} -78^\circ$ по долготе (рис. 2). Объемы земной коры рассматриваемой территории на глубинах 0–35 км в поле широтной компоненты испытывают преимущественно деформации укорочения (отрицательные значения – обозначены желтым цветом), при этом деформации удлинения (положительные значения – обозначены красным цветом) проявляются в основном только в некоторых районах западнее желоба – в области океанического поднятия, а также в ряде случаев южнее 39° ю.ш. – в области дислокаций Чилийского землетрясения 1960 г. с $M_w=9.5$. Поле меридиональной ком-

поненты деформаций менее однородно и характеризуется мозаичной структурой, но несколько чаще – положительными значениями в центральной части и отрицательными на севере и юге рассматриваемой области (рис. 2, а). Вертикальная компонента СТД характеризуется общим удлинением за исключением отмеченных выше отдельных участков с широтным удлинением в области океанического поднятия и южнее 39° ю.ш.

Полученные нами значения сейсмоструктурных деформаций сопоставлялись с широтными и меридиональными компонентами деформаций, определенными по материалам космической геодезии и приведенными в работах [Marotta et al., 2013; Sánchez et al., 2011]. Для исследуемой области обнаруживается совпадение в деформировании поверхностных (определенных из данных GPS) и глубинных объемов земной коры, полученных из расчета СТД по механизмам очагов землетрясений. Примером служит поле деформаций широтной компоненты для западной части Южной Америки. Но в поле меридиональной компоненты, определенной по механизмам очагов землетрясений и по данным GPS, наблюдаются некоторые различия. Для меридиональной составляющей СТД наблюдается мозаичность в чередовании объемов земной коры с разными знаками деформаций вдоль зоны субдукции (рис. 2, а), тогда как по данным GPS выделяются более обширные области удлинения – от 27 до 34° ю.ш. и от 36 до 47° ю.ш. Между этими областями располагается участок приповерхностного укорочения.

Эпицентр землетрясения 27 февраля 2010 г. располагался в области широтного укорочения, а наиболее сильный афтершок (27 февраля, $M_w=7.4$) произошел в области океанического поднятия, вблизи границы смены характера деформаций в поле широтной компоненты, причем с механизмом очага сбросового типа.

Сейсмоструктурные деформации на глубинах 36–70 км. В следующем слое (36–70 км) картина деформаций мало меняется по сравнению с деформациями верхнего слоя земной коры (рис. 2, б), но некоторые отличия все-таки имеются. Так, вертикальная компонента вдоль всего побережья сохраняет положительные значения и не меняет знак южнее 39° ю.ш. Однако так же, как и в верхнем слое коры, южнее 39-й параллели в ряде случаев отмечаются деформации противоположного знака по отношению к центральной части.

Сейсмоструктурные деформации на глубинах 71–150 км и 151–300 км. В погружающейся плите на глубинах 71–150 км и 151–300 км картина сейсмоструктурных деформаций резко меняется (рис. 2, в, г). Объемы горных масс испытывают преимущественно широтное удлинение и вертикаль-

ное укорочение, то есть в глубоких слоях континента осуществляется деформация, противоположная той, что мы наблюдали на глубинах 0–35 км и 36–70 км. В меридиональном направлении наблюдается неоднородное поле деформаций: чередование объемов горных масс с положительными и отрицательными значениями.

Карты максимальных значений сейсмоструктурных деформаций. Наряду с вышеприведенными картами были построены карты максимальных значений сейсмоструктурных деформаций (рис. 3), на которых для каждой ячейки выбирались наибольшие значения деформации по абсолютной величине.

Из трех диагональных компонент (E_{xx} , E_{yy} , E_{zz}) для глубин 0–35 км и 36–70 км наибольшую площадь занимают максимальные значения широтного укорочения (приблизительно с 23 до 33° с.ш.), южнее и севернее этой зоны максимальные значения приобретает вертикальное удлинение. Последний факт может указывать на условия близгоризонтального сжатия по широтной и меридиональной компонентам, то есть на условия уплотнения среды. Эти условия также характерны для ближней зоны очага землетрясения Мауле и для северной части рассматриваемой области субдукции (рис. 3). Область деструкции землетрясения Мауле с юга, запада и частично с севера окружают участки с максимальными значениями деформаций широтного удлинения и вертикального укорочения. Поскольку, согласно рис. 2, а, на этих же участках мы наблюдаем широтное и меридиональное удлинение, вероятная геомеханическая интерпретация может указывать на условия разуплотнения среды в этих местах. В более глубоких слоях (71–300 км) чередуются области максимального широтного удлинения и максимального вертикального укорочения.

Следующее сильное землетрясение (16 сентября 2015 г., $M_w=8.2$) на исследуемой территории произошло на северном окончании области, в которой наряду с максимальными значениями широтного сжатия преобладали максимальные значения вертикального удлинения (рис. 3). Не вызывает сомнений тот факт, что оно было в определенной степени инициировано землетрясением Мауле, так как произошло в непосредственной близости от северного окончания его афтершоковой области.

Характер сейсмоструктурных деформаций до и после землетрясения Мауле. Нами рассмотрено поведение сейсмоструктурных деформаций за отдельные отрезки времени: 1976–1985 гг., 1986–2009 гг. и 2010–2014 гг. для интервалов глубин 0–35 км (рис. 4, а) и 36–70 км (рис. 4, б). Отметим, что как перед главным событием, так и после него тип деформаций на глубинах 36–70 км

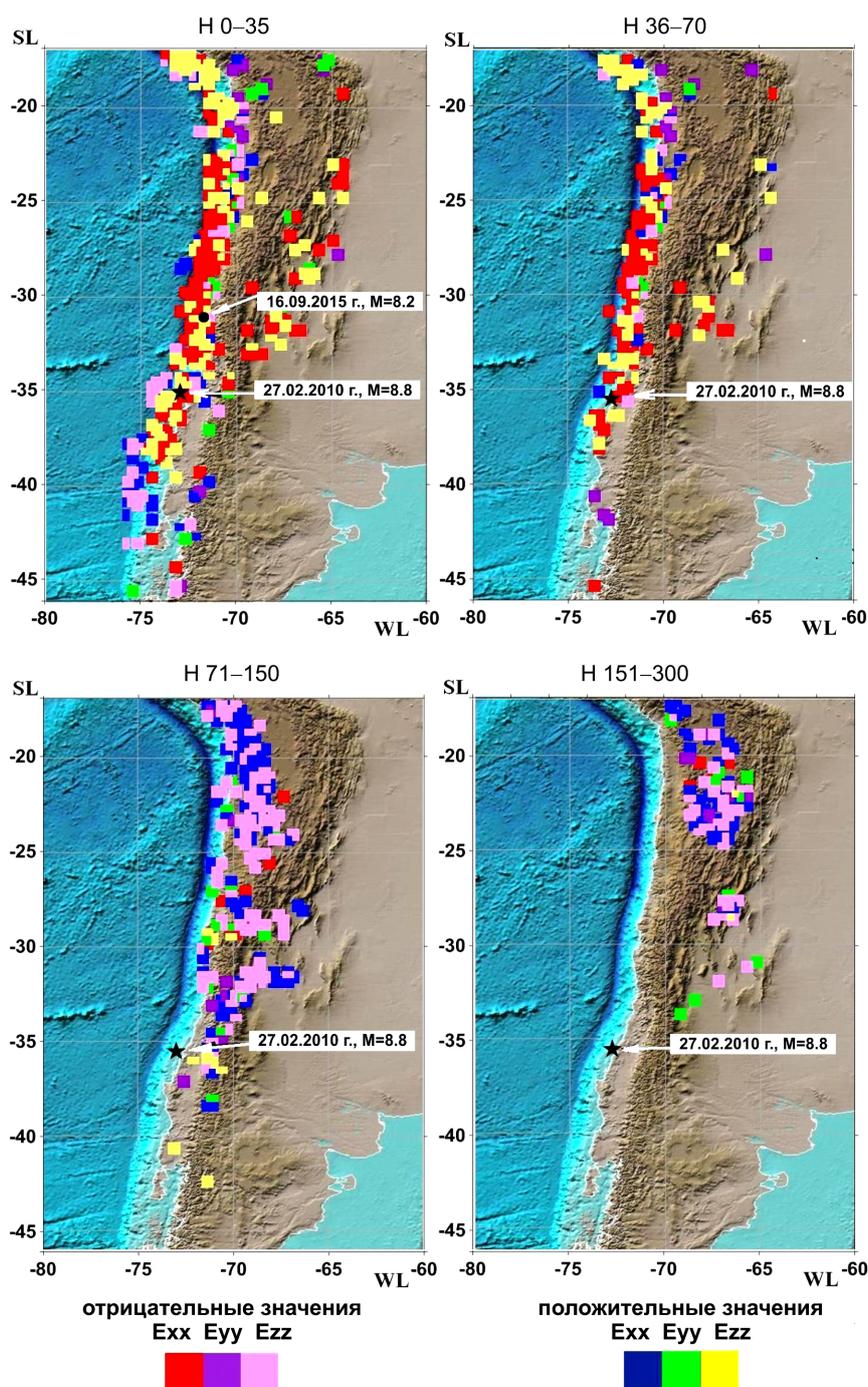


Рис. 3. Карта максимальных значений (по абсолютной величине) одной из трех компонент тензора сейсмотектонических деформаций в географической системе координат. Максимальные значения деформаций укорочения (отрицательные значения): красный – E_{xx} , сиреневый – E_{yy} , розовый – E_{zz} ; максимальные значения деформаций удлинения (положительные значения): темно-синий – E_{xx} , зеленый – E_{yy} , желтый – E_{zz} .

Fig. 3. Map of maximum (absolute) values of one of the three components of seismotectonic deformation tensors in the geographical system of coordinates. Maximum values of shortening (negative values): red – E_{xx} , lilac – E_{yy} , pink – E_{zz} . Maximum values of stretching (positive values): dark blue – E_{xx} , green – E_{yy} , yellow – E_{zz} .

достаточно однороден по сравнению с глубинами 0–35 км, где на фоне преобладания близширотного укорочения наблюдаются области удлинения, приуроченные главным образом к району океанического поднятия.

Хотя преобладание близширотного укорочения в течение всех трех периодов на глубинах до 70 км (рис. 4, а, б) сохраняется (кроме района к югу от области основных дислокаций), имеются важные отличия в пространственном распределении проти-

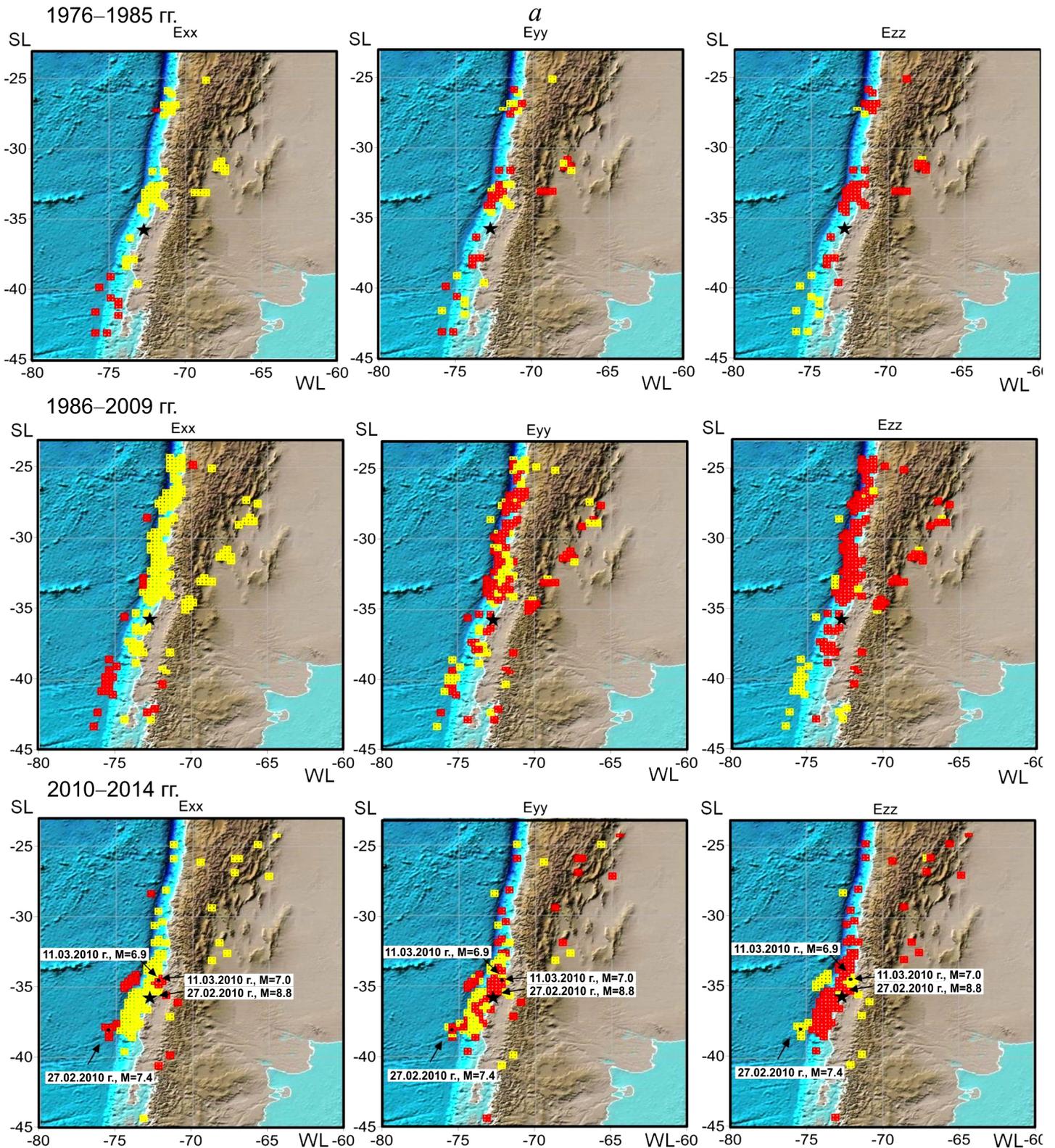


Рис. 4. Сейсмотектонические деформации Exx, Eyy, Ezz на глубинах 0–35 км (а) и 36–70 км (б) для двух временных интервалов до землетрясения Мауле (1976–1985 гг. и 1986–2009 гг.) и одного интервала после землетрясения (2010–2014 гг.). Желтыми квадратами показаны области укорочения, красными – удлинения в соответствующих направлениях.

Fig. 4. Seismotectonic deformation Exx, Eyy, and Ezz at depths of 0–35 km (a) and 36–70 km (b) for two time intervals before the Maule earthquake (1976–1985 and 1986–2009) and one time interval after the earthquake (2010–2014). Areas in boxes: yellow – shortening, red – stretching; arrows – directions.

σ

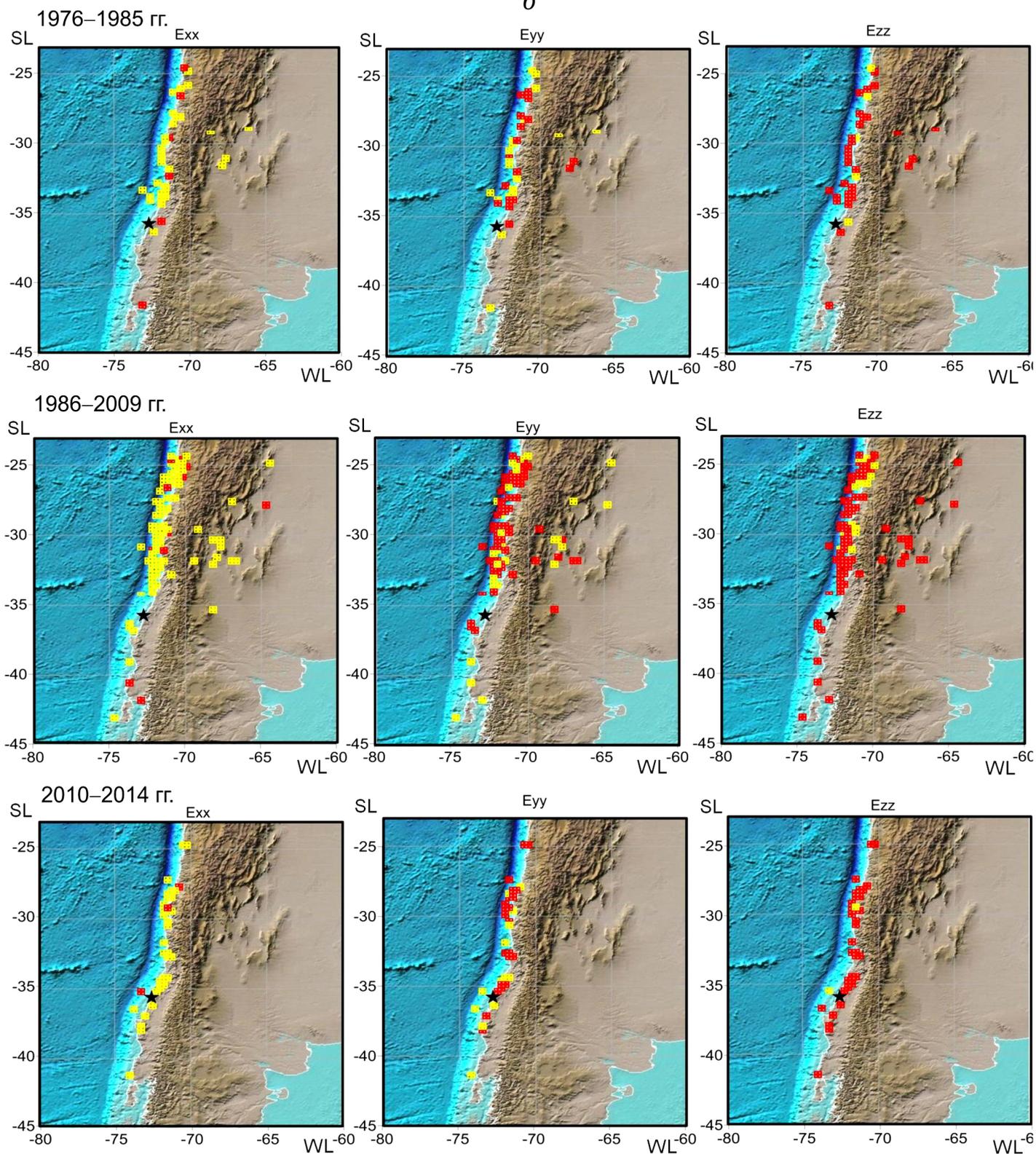


Рис. 4 (окончание).

Fig. 4 (end).

воположного типа деформаций – широтного удлинения в районе океанического поднятия к западу

от желоба (зона «outer rise seismicity») и на северной границе области дислокаций.

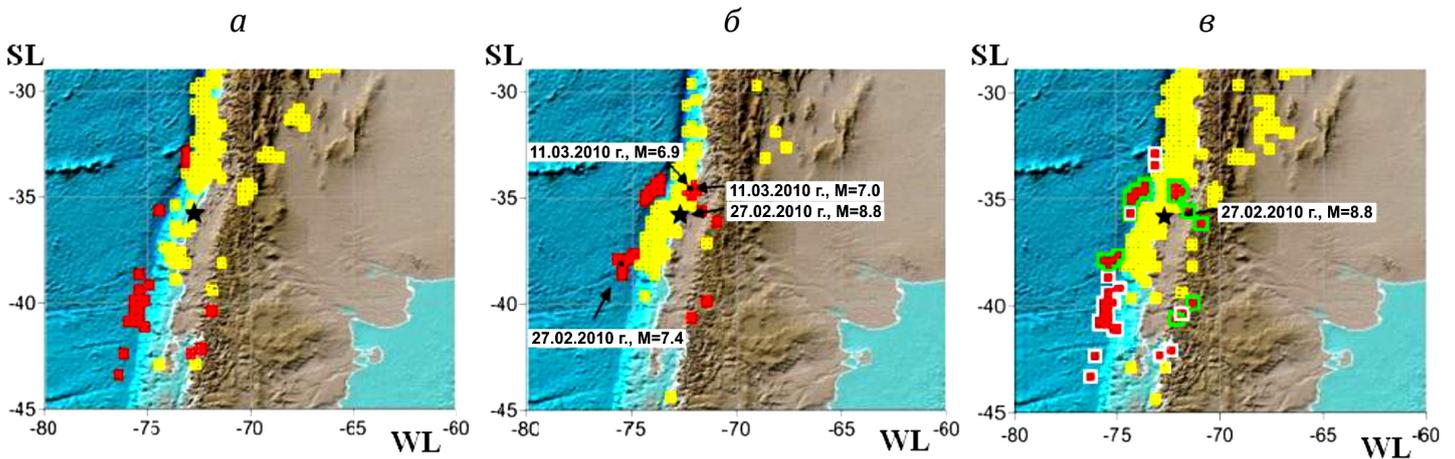


Рис. 5. Пространственное распределение участков с деформациями широтного удлинения и укорочения до (1976–2009 гг.) и после (2010–2014 гг.) землетрясения Мауле – рисунки 5а и 5б, соответственно. Желтыми квадратами показаны области широтного укорочения, красными – удлинения. На рис. 5в участки широтного удлинения за период до землетрясения Мауле (1976–2009 гг.) обведены белыми линиями, а участки с таким же типом деформаций за период после этого землетрясения (2010–2014 гг.) – зелеными.

Fig. 5. The spatial pattern of areas deformed by stretching and shortening before (Fig. 5a – 1976–2009) and after (Fig. 5б – 2010–2014) the Maule earthquake. Areas in boxes: yellow – shortening, red – stretching; arrows – directions. In Fig. 5в, boxes show areas of latitudinal stretching: white – 1976–2009, before the Maule earthquake; green – 2010–2014, after the earthquake.

Во-первых, следует отметить, что после землетрясения область сейсмодислокаций землетрясения Мауле на глубинах 0–35 км оказалась окруженной отдельными участками широтного удлинения не только с юга и запада, но и с севера (см. рис. 4, а). При этом как перед главным событием, так и после него характер деформаций на глубинах 36–70 км (рис. 4, б) был достаточно однороден по сравнению с глубинами 0–35 км.

Во-вторых, если до землетрясения, в 1986–2009 гг., участки широтного удлинения концентрировались в области океанического поднятия с внешней стороны границ будущего дислокационного блока (южнее и севернее от него), то после землетрясения Мауле, во время афтершокового процесса, удлинение наблюдалось с внутренней стороны этих границ – напротив блока (рис. 5). Таким образом, области деформаций удлинения на океаническом поднятии могут указывать на границы будущей сейсмодислокации и являться возможным сейсмопрогностическим критерием.

Следует напомнить, что область дислокации располагалась между ослабленными зонами в океанической коре – хребтом Хуан Фернандес (Juan Fernández Ridge) на севере и разломной зоной Моча на юге. Кроме того, определенную роль в дислокационном процессе могли играть разломы Lanahue и Pichilemu (см. рис. 1).

Особенности в поведении сейсмичности до и после землетрясения Мауле к западу от желоба, в

области океанического поднятия, для которой в целом характерны механизмы очагов сбросового типа и, соответственно, деформации удлинения в крест простирания желоба, рассматривались в работе [Moscoso, Contreras-Reyes, 2012]. Наши данные о сейсмодислокационных деформациях подтверждают наличие этого явления и позволяют предложить для него уточненную блоковую модель, которая включает блок континентальной литосферы с зацеплением вследствие высокоскоростного поднятия [Hicks et al., 2012] в океанической литосфере.

В «зацепленном» состоянии, до землетрясения, на океаническом поднятии в местах литосферных неоднородностей (хребет Juan Fernández Ridge, разломная зона Моча) могут формироваться области повышенных значений напряжений растяжения с внешних сторон блока, на нижней границе которого произойдет сейсмодислокация.

После сейсмической подвижки рассматриваемого блока области близширотного растяжения формируются, так же как и в предыдущем случае, в районе океанического поднятия около северной и южной границы области деструкции, но уже с внутренней стороны – напротив блока, на нижней границе которого имела место сейсмодислокация (рис. 5).

Важно отметить, что южная граница афтершоковой области землетрясения Мауле 27 февраля 2010 г. проходит в районе 39-й параллели (рис. 6). Северная граница афтершоковой области проходит

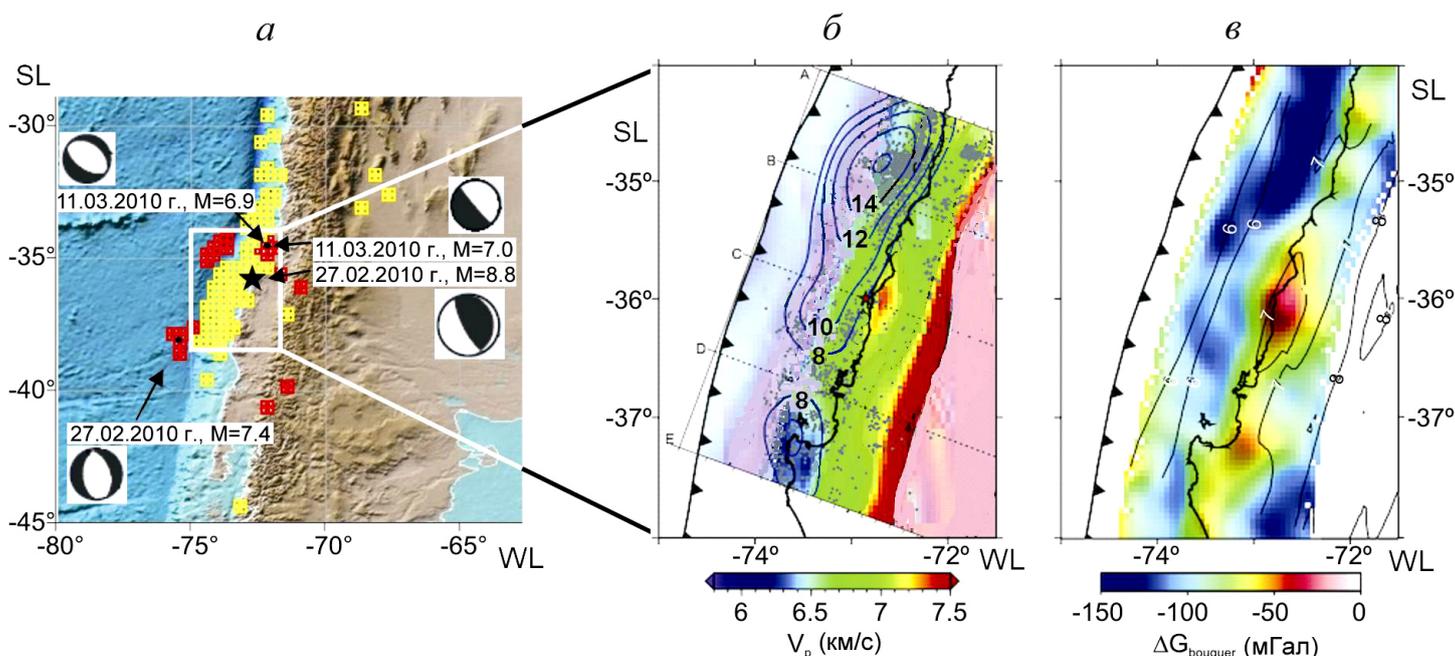


Рис. 6. Сравнение поля широтной сейсмотектонической деформации для периода с 27.10.2010 г. по 31.12.2014 г. (а) с распределением значений скорости V_p на поверхности межплитной границы [Hicks et al., 2012], интенсивностью косейсмических смещений [Moreno et al., 2012] (б) и аномалиями Буге гравитационного поля (в) [Tassara, Echaurren, 2012].

Расположение высокоскоростной аномалии под береговой линией коррелирует с районом относительно низких значений косейсмических смещений, а два главных максимума этих смещений коррелируют с низкими значениями Р-волн и аномалий Буге, а также участками широтного удлинения. Показаны косейсмические смещения, превышающие 8 м. Желтыми квадратами показаны области широтного укорочения, красными – удлинения (а). Кроме того, приведены механизмы очагов главного события с $M_w=8.8$ и трех самых сильных афтершоков с $M_w=7.4$, 7.0 и 6.9.

Fig. 6. (a) Latitudinal seismotectonic deformation field reconstructed for the period from 27 October 2010 to 31 December 2014 in comparison with the pattern of velocity V_p on the surface of the interplate boundary [Hicks et al., 2012], (б) the intensity of coseismic slip [Moreno et al., 2012], and (в) the Bouguer gravity anomalies [Tassara, Echaurren, 2012].

The location of the high-velocity anomaly beneath the coastline correlates with the area of relatively low values of coseismic slip. The two main maximums of the slip correlate with the low values of P waves and Bouguer anomalies, as well as with the areas of latitudinal stretching. The scheme shows coseismic slip exceeding 8 m. The isolines are spaced by 2 m. Areas in boxes in Fig. 6a: yellow – shortening, red – stretching. The focal mechanisms are shown for the main event ($M_w=8.8$) and three strongest aftershocks ($M_w=7.4$, 7.0 and 6.9).

между 32 и 33-й параллелями вблизи хребта Хуан Фернандес [Rietbrock et al., 2012]. Построенные нами по разные стороны от 32-й параллели сечения с гипоцентрами землетрясений с $M \geq 4$ по широте 31.7° ю.ш. и широте 33.7° ю.ш. показывают существенные различия пространственного распределения подкоровых очагов (рис. 7), что может объясняться различным глубинным строением среды в районе северной границы афтершоковой области [Feng et al., 2007]. Напомним также, что северное окончание области афтершоков приурочено к северной границе крупного позднепалеозойского батолита [Martin et al., 1999].

Землетрясение Мауле сопровождалось несколькими сильными афтершоками со сбросовым типом подвижек [Ruiz, Contreras-Reyes, 2015]. Так, в южной части окончания области дислокаций, в районе океанического поднятия, вблизи зоны разломов

Моча, как уже отмечалось, возник сильный афтершок (27 февраля 2010 г., $M_w=7.4$) с механизмом сбросового типа (см. рис. 6). Около северной границы области дислокаций произошел афтершок с $M_w=7.0$ и ряд более слабых событий сбросового типа. Известно, что вблизи окончаний областей деформации среды в условиях близгоризонтального сжатия могут наблюдаться участки с другим типом деформирования – близгоризонтальным растяжением (см., например [Osokina, Tsvetkova, 1979; Osokina, Friedman, 1987]). Однако в данном случае мы исследуем несколько иной тип деформирования среды, обусловленный субдукционными процессами, который требует учета ряда специфических факторов при построении дислокационной модели.

Рассмотрим более детально район к северу от эпицентра землетрясения Мауле, где в относительно узкой полосе от ~ 34.3 до 34.6° ю.ш. наблю-

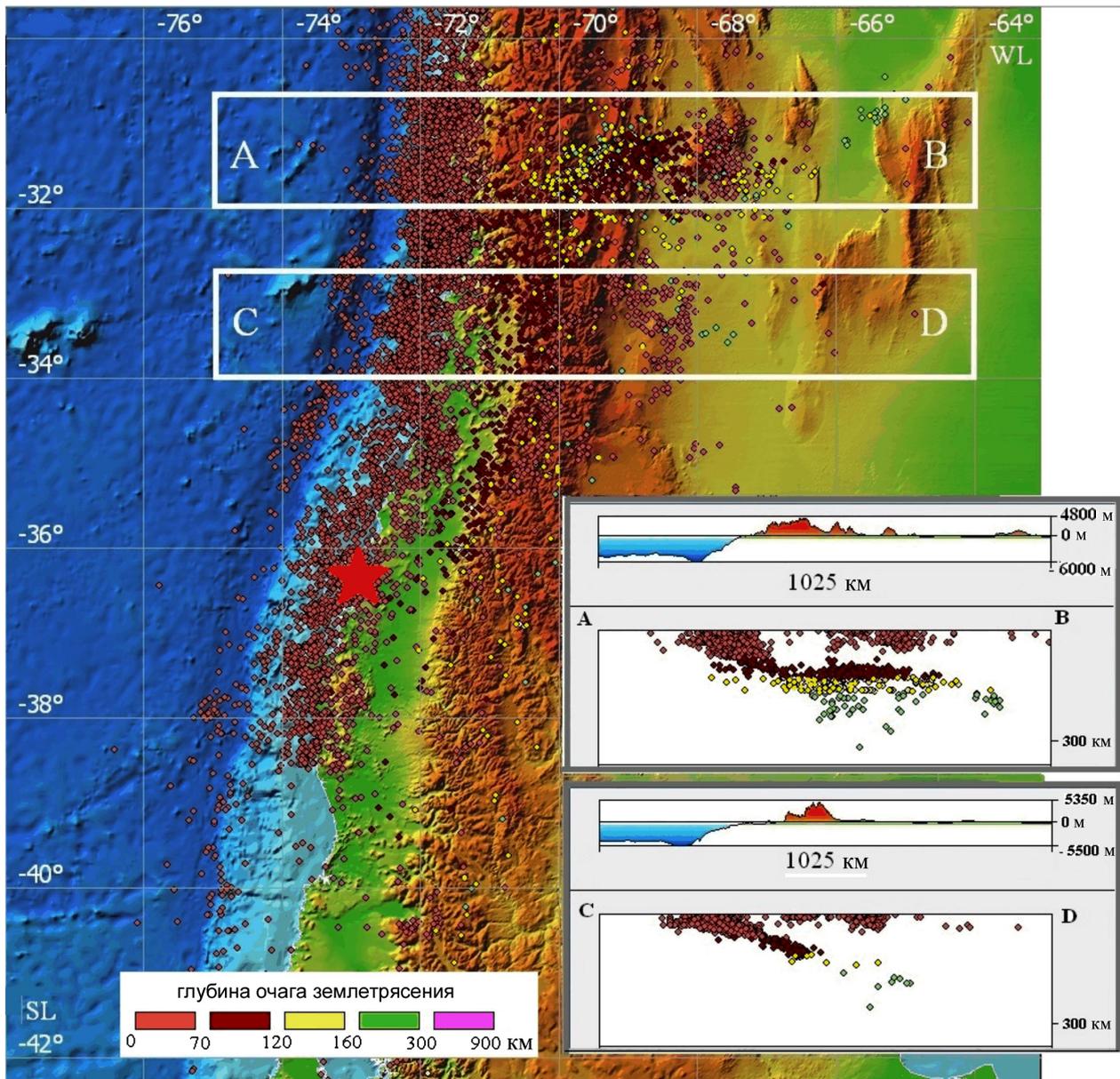


Рис. 7. Вертикальные сечения зоны субдукции вдоль параллелей $31.2 \pm 0.7^\circ$ ю.ш. (по линии А-В) и $33.2 \pm 0.7^\circ$ ю.ш. (по линии С-Д) с гипоцентрами землетрясений с $M > 4$.

Fig. 7. Vertical profiles of the subduction zone along latitudes of $31.2 \pm 0.7^\circ$ S (A-B line) and $33.2 \pm 0.7^\circ$ S (C-D line), and hypocenters of $M > 4$ earthquakes.

даются сейсмотектонические деформации растяжения (см. рис. 5 и 6) и где 11.03.2010 г., через 12 дней после землетрясения Мауле, имели место три сильных афтершока с $M_w = 6.0-7.0$ со сбросовым механизмом очага. Ряд других менее сильных событий со сбросовыми механизмами в этом районе происходили как до этих сильных афтершоков, так и после них. Таким образом, эта область находилась в условиях близгоризонтального растяжения, по крайней мере, с момента главного события. Если сопоставить расположение этого участка с распределением интенсивности смещений вдоль плоско-

сти разрыва, то он приходится на область затухания амплитуды смещений после главного максимума, который расположен южнее, приблизительно на 35° ю.ш. (см. рис. 6, б).

Эффект преобладания надвигового типа подвижек в очагах землетрясений перед землетрясением Мауле. В работе [Xiaoshan et al., 2012] перед землетрясением Мауле выявлен эффект согласованности направлений главных осей Р, В и Т механизмов очагов землетрясений, происходящих в области будущей афтершоковой активности на глубинах до 70 км, с соответствующими

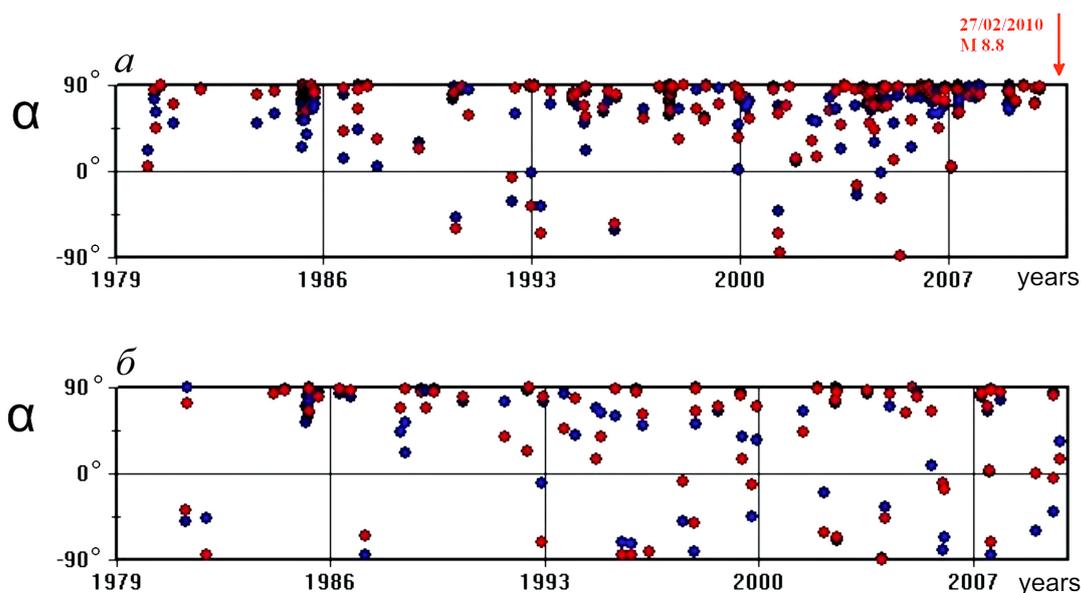


Рис. 8. Изменение во времени угла подвижки (slip) относительно горизонтальной линии для каждой из двух нодальных плоскостей (красный и синий кружки) сейсмических событий, произошедших в районе будущей афтершоковой области землетрясения Мауле.

Угол подвижки между 0 и $+90^\circ$ – сдвиго-взбросы, взбросо-сдвиги и взбросы; между 0 и -90° – сдвиго-сбросы, сбросо-сдвиги и сбросы; 0° – чистый сдвиг; $+90^\circ$ – взброс; -90° – сброс. Наблюдается эффект абсолютного преобладания надвигового типа подвижки в очагах землетрясений за три года перед землетрясением Мауле для глубин очагов от 0 до 40 км (а). Ниже, на глубинах от 41 до 80 км, подобный эффект отсутствует (б).

Fig. 8. Temporal changes of the slip angle relative to the horizontal line for each of the two nodal planes (red and blue circles) of the seismic events in the future Maule earthquake aftershock zone.

Slip angle: 0 to $+90^\circ$ – reverse faults with strike-slip component, strike-slip faults with reverse component, and reverse fault; 0 to -90° – normal faults with strike-slip component, strike-slip faults with normal component, and normal faults; 0° – pure strike-slip fault; $+90^\circ$ – reverse fault; -90° – normal fault. For the earthquake sources at depth from 0 to 40 km (a), thrusting was absolutely dominant three years before the Maule earthquake. This effect was lacking at depths from 41 to 80 km (b).

направлениями осей поля тектонических напряжений. Значения последних определялись как средние по всем фокальным механизмам (222 определения) за двадцатилетний период перед землетрясением Мауле. В последние четыре года перед землетрясением отклонения направления осей механизмов очагов каждого из происходящих событий от направления осей поля тектонических напряжений были минимальными.

Мы рассмотрели поведение другого параметра, а именно, как меняется со временем количество очагов со взбросовой и сбросовой компонентами подвижки (рис. 8). Методика наглядного графического построения изменений во времени значений угла смещения (slip) относительно горизонтальной линии для каждой из нодальных плоскостей достаточно проста [Djadkov et al., 1999]. На графике по оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат – значения угла между горизонтальной линией на нодальной плоскости и направлением подвижки по ней. Смещения в верхнюю часть нодальной плоскости имеют положительные значения угла от 0 до

$+90^\circ$ (присутствует взбросовая компонента подвижки), а в нижнюю – отрицательные от 0 до -90° (присутствует сбросовая компонента). Опция построения графика включена в геоинформационную систему GIS EEDB [Dyadkov, Mikheeva, 2010].

На последнем этапе подготовки землетрясения Мауле (2007–2009 гг.) на глубинах 0 – 40 км наблюдалось абсолютное преобладание механизмов со взбросовой компонентой подвижки (рис. 8, а), что в принципе подтверждает выводы, сделанные в работе [Xiaoshan et al., 2012]. Другой характер поведения этого параметра имел место для глубин 41 – 70 км, где мы не отмечаем такого эффекта (рис. 8, б).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, объемы литосферы до глубин 70 км в юго-западной части побережья Южной Америки на контакте тектонических плит Наска и Южно-Американской сокращаются в широтном направлении и удлиняются в вертикальном. В меридио-

нальном направлении горные массы испытывают чередование областей удлинения и укорочения. Такой же характер деформаций в основном имел место в зоне подготовки землетрясения Мауле. На глубине ниже 70 км происходит резкая смена характера деформаций: широтное укорочение меняется на широтное удлинение, а вертикальное удлинение – на вертикальное укорочение.

Важную роль в подготовке мегаземлетрясения Мауле играли геологические условия. Во-первых, сегментация океанической литосферы определялась ее ослабленными зонами – хребтом Хуан Фернандес на севере и разломной зоной Моча на юге. Отсутствие между этими зонами других ослабленных мест определило, по-видимому, большие размеры блока, который участвовал в дислокации при землетрясении Мауле. Во-вторых, высокоскоростное поднятие на границе слэба и океанической плиты, выявленное по данным сейсмического зондирования и гравиметрии [Hicks et al., 2012; Tassara, Echaurren, 2012], по всей видимости, выполняло роль межплитного «зацепа».

Хотя после землетрясения Мауле преобладающий стиль деформирования (широтное укорочение) не изменился, очаговая область оказалась окруженной отдельными участками с противоположным типом деформаций – широтным удлинением. Поскольку для этих участков в большинстве случаев характерно удлинение и по меридиональной оси, это может свидетельствовать о вероятном геомеханическом состоянии среды в этих областях, а именно – о ее разупрочнении. В то же время в районе эпицентра (вблизи зарождения дислокации землетрясения Мауле) имеются участки с близширотным и близмеридиональным укорочением, что свидетельствует о наличии здесь процессов стеснения среды.

Следует отметить выявленный нами эффект абсолютного преобладания надвигового типа подвижки в очагах землетрясений будущей афтершоковой области за три года перед землетрясением Мауле для глубин очагов от 0 до 40 км. В определенной степени он подтверждает полученный в работе [Xiaoshan et al., 2012] эффект согласованности направлений главных осей механизмов очагов с соответствующими направлениями осей поля тектонических напряжений этого района.

Важным результатом явилось обнаружение эффекта особого поведения сеймотектонических деформаций в зоне океанического поднятия вблизи границ будущей сейсмодислокации. Если до землетрясения, в 1986–2009 гг., участки широтного удлинения концентрировались в области океанического поднятия с внешней стороны границ будущего блока аллохтона (южнее и севернее от него), то после землетрясения Мауле, во время афтершокового процесса, удлинение наблюдалось с внутренней стороны этих границ – напротив блока. Таким образом, районы с деформациями близгоризонтального удлинения на океаническом поднятии могут указывать на границы будущей сейсмодислокации и являться критерием для выделения сейсмоопасных зон.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность В.И. Мельниковой, С.В. Трофименко и В.А. Санькову за ценные замечания, способствующие улучшению статьи. Исследование поддержано грантами РФФИ 14-05-00688, 17-05-01234 и частично проектами ФНИ IX.128.2.3, IX.128.1.1.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Angermann D., Klotz J., Reigber C., 1999. Space-geodetic estimation of the Nazca–South America Euler vector. *Earth and Planetary Science Letters* 171 (3), 329–334. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00173-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00173-9).
- Bianchi M., Heit B., Jakovlev A., Yuan X., Kay S.M., Sandvol E., Alonso R.N., Coira B., Brown L., Kind R., Comte D., 2013. Teleseismic tomography of the southern Puna plateau in Argentina and adjacent regions. *Tectonophysics* 586, 65–83. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.11.016>.
- Bilek S.L., 2010. Invited review paper: Seismicity along the South American subduction zone: Review of large earthquakes, tsunamis, and subduction zone complexity. *Tectonophysics* 495 (1–2), 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.037>.
- Campos J., Hatzfeld D., Madariaga R., Lopez G., Kausel E., Zollo A., Iannaccone G., Fromm R., Barriento, S., Lyon-Caen H., 2002. A seismological study of the 1835 seismic gap in south-central Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 132 (1–3), 177–195. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(02\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(02)00051-1).
- Djadkov P.G., Mel'nikova V.I., Nazarov L.A., Nazarova L.A., San'kov V.A., 1999. Increase of seismotectonic activity in the Baikal region in 1989–95: results of experimental observations and numerical modeling of changes in the stress-strained state. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 40 (3), 373–386.
- Djadkov P., Mikheeva A., 2010. The expert earthquake database (EEDB) for seismic-geodynamic research. *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics* 13, 15–30.

- Feng M., van der Lee S., Assumpç M., 2007. Upper mantle structure of South America from joint inversion of waveforms and fundamental mode group velocities of Rayleigh waves. *Journal of Geophysical Research* 112 (B4), B04312. <https://doi.org/10.1029/2006JB004449>.
- Global CMT Catalog Search, 2017. Available from: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (last accessed August 14, 2017).
- Hicks S.P., Rietbrock A., Haberland C.A., Ryder I.M.A., Simons M., Tassara A., 2012. The 2010 Mw 8.8 Maule, Chile earthquake: nucleation and rupture propagation controlled by a subducted topographic high. *Geophysical Research Letters* 39 (19), L19308. <https://doi.org/10.1029/2012GL053184>.
- Kostrov B.V., 1975. Mechanics of Tectonic Earthquake Source. Nauka, Moscow, 176 p. (in Russian) [Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.]
- Lange D., Tilmann F., Barrientos S.E., Contreras-Reyes E., Methe P., Moreno M., Heit B., Agurto H., Bernard P., Vilotte J.-P., Beck S., 2012. Aftershock seismicity of the 27 February 2010 Mw 8.8 Maule earthquake rupture zone. *Earth and Planetary Science Letters* 317–318, 413–425. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.11.034>.
- Marotta G.S.A., França G.S., Monico J.F.G., Fuck R.A., de Araújo Filho J.O., 2013. Strain rate of South American lithospheric plate by SIRGAS-CON geodetic observations. *Journal of South American Earth Sciences* 47, 136–141. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.07.004>.
- Martin M.W., Kato T.T., Rodriguez C., Godoy E., Duhart P., McDonough M., Campos A., 1999. Evolution of the late Paleozoic accretionary complex and overlying forearc–magmatic arc, south central Chile (38°–41°S): constraints for the tectonic setting along the southwestern margin of Gondwana. *Tectonics* 18 (4), 582–605. <https://doi.org/10.1029/1999TC900021>.
- Melnick D., Moreno M., Cisternas M., Tassara A., 2012. Darwin seismic gap closed by the 2010 Maule earthquake. *Andean Geology* 39 (3), 558–563. <https://doi.org/10.5027/andgeoV39n3-a11>.
- Métis M., Socquet A., Vigny C., Carrizo D., Peyrat S., Delorme A., Maureira E., Valderas-Bermejoand C.-M., Ortega I., 2013. Revisiting the North Chile seismic gap segmentation using GPS-derived interseismic coupling. *Geophysical Journal International* 194 (3), 1283–1294. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt183>.
- Moreno M.S., Bolte J., Klotz J., Melnick D., 2009. Impact of megathrust geometry on inversion of coseismic slip from geodetic data: Application to the 1960 Chile earthquake. *Geophysical Research Letters* 36 (16), L16310. <https://doi.org/10.1029/2009GL039276>.
- Moreno M., Melnick D., Rosenau M., Baez J., Klotz J., Oncken O., Tassara A., Chen J., Bataille K., Bevis M., Socquet A., Bolte J., Vigny C., Brooks B., Rider I., Grund V., Smalley B., Carrizo D., Bartsch M., Hase H., 2012. Toward understanding tectonic control on the Mw 8.8 2010 Maule Chile earthquake. *Earth and Planetary Science Letters* 321–322, 152–165. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.01.006>.
- Moscoso E., Contreras-Reyes E., 2012. Outer rise seismicity related to the Maule, Chile 2010 megathrust earthquake and hydration of the incoming oceanic lithosphere. *Andean Geology* 39 (3), 564–572. <https://doi.org/10.5027/andgeoV39n3-a12>.
- Osokina D.N., Friedman V.N., 1987. The study of structural regularities of the stress field in the vicinity of the shear rupture with friction of its sides. In: Yu.D. Bulanzhe (Ed.), Fields of stress and strain in the Earth's crust. Nauka, Moscow, p. 74–119 (in Russian) [Осокина Д.Н., Фридман В.Н. Исследование закономерностей строения поля напряжений в окрестностях сдвигового разрыва с трением между берегами // Поля напряжений и деформаций в земной коре / Ред. Ю.Д. Буланже. М.: Наука, 1987. С. 74–119].
- Osokina D.N., Tsvetkova N.Yu., 1979. Local stress fields and prediction of secondary failure in vicinities of faults and at earthquake sources with regard to the third principal stress. In: A.S. Grigor'ev, D.N. Osokina (Eds.), Lithospheric stress and strain fields. Nauka, Moscow, p. 163–184 (in Russian) [Осокина Д.Н., Цветкова Н.Ю., 1979. Изучение локального поля напряжений и прогноз вторичных нарушений в окрестностях тектонических разрывов и в очагах землетрясений с учетом третьего главного напряжения // Поля напряжений и деформаций в литосфере / Ред. А.С. Григорьев, Д.Н. Осокина. М.: Наука, С. 163–184].
- Rebetsky Y., Tatevossian R., 2013. Rupture propagation in strong earthquake sources and tectonic stress field. *Bulletin de la Société Géologique de France* 184 (4–5), 335–346. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.184.4-5.335>.
- Rietbrock A., Ryder I., Hayes G., Haberland C., Comte D., Roecker S., Lyon-Caen H., 2012. Aftershock seismicity of the 2010 Maule Mw=8.8, Chile, earthquake: Correlation between co-seismic slip models and aftershock distribution? *Geophysical Research Letters* 39 (8), L08310. <https://doi.org/10.1029/2012GL051308>.
- Riznichenko Yu.V., 1985. Problems of Seismology. Nauka, Moscow, 408 p. (in Russian) [Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.]
- Ruegg J.C., Rudloff A., Vigny C., de Chabaliér J.B., Campos J., Kausel E., Barrientos S., Dimitrov D., 2009. Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Concepcion-Constitution in Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 175 (1–2), 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.02.015>.
- Ruiz J.A., Contreras-Reyes E., 2015. Outer rise seismicity boosted by the Maule 2010 Mw 8.8 megathrust earthquake. *Tectonophysics* 653, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.04.007>.

- Sánchez L., Seitz D.M., 2011. Recent activities of the IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS (IGS RNAAC SIR). *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut der Technischen Universität München, PANGAEA*, Report No. 87, 48 p. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.835100>.
- Tassara A., Echaurren A., 2012. Anatomy of the Andean subduction zone: three-dimensional density model upgraded and compared against global-scale models. *Geophysical Journal International* 189 (1), 161–168. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05397.x>.
- USGS Earthquake Hazards Program, 2017. NEIC catalog search. Available from: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (last accessed August 14, 2017).
- Xiaoshan W., Gailing D., Xiangdong F., Yaqiong Y., 2012. Characteristics of focal mechanisms in Chile subduction. *Geodesy and Geodynamics* 3 (3), 23–28. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1246.2012.00023>.



Дядьков Пётр Георгиевич, канд. геол.-мин. наук, в.н.с.
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, Новосибирск, проспект академика Коптюга, 3, Россия
Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия
Тел.: (383)3330399; ✉ e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

Dyadkov, Pyotr G., Candidate of Geology and Mineralogy, Lead Researcher
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia
Novosibirsk State University
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia
Tel.: (383)3330399; ✉ e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru



Кучай Ольга Анатольевна, канд. физ.-мат. наук, с.н.с.
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, Новосибирск, проспект академика Коптюга, 3, Россия
Тел.: +7(383)3308705; e-mail: KuchayOA@ipgg.nsc.ru

Kuchay, Olga A., Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia
Tel.: +7(383)3308705; e-mail: KuchayOA@ipgg.nsc.ru



Романенко Юлия Михайловна, н.с.
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, Новосибирск, проспект академика Коптюга, 3, Россия
Тел.: +7(383)3330399; e-mail: RomanenkoYM@ipgg.sbras.ru

Romanenko, Yulia M., Researcher
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia
Tel.: +7(383)3330399; e-mail: RomanenkoYM@ipgg.sbras.ru