

**DEFORMATIONS IN THE MIDDLE AMERICA TRENCH
ACCORDING TO EARTHQUAKE FOCAL MECHANISMS AND THEIR FEATURES
IN THE AREA OF THE 2017 M_w 8.2 CHIAPAS EARTHQUAKE, MEXICO**

P.G. Dyadkov, O.A. Kuchay, Y.M. Romanenko, Z.S. Dzhumagaliyeva

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

ABSTRACT. Seismotectonic deformations in the Middle America Trench and their features in the area of preparation of the Chiapas earthquake, $M_w=8.2$, 08 September 2017, were determined using the data on 2244 focal mechanisms of earthquakes for the period of 1977–2017. The distribution of seismicity with depth was studied in detail. The decrease in the depth of the Benioff zone in the north-western subduction segments and the increase in the south-eastern segments is associated with the age of the subducting parts of the Cocos plate and the angle of their immersion. The latter mechanism can also explain the presence of earthquakes with normal focal mechanism on the oceanic uplift in the south-eastern segments of the subduction zone and their absence in the north-western ones. In general, the typical character of subduction deformations has a number of features in the Middle America Trench. The predominance of shortening by horizontal components and elongation by vertical ones at depths up to 35 km is replaced by the transitional type with mosaic distribution of deformations of different signs in the depth range of 36–70 km. Even lower, in the depth range of 70–105 km, the type of deformation changes to the opposite with respect to the upper horizon. The Chiapas earthquake occurred on the border of regions with different types of deformation, which indicates softening of the block's medium to the west of the hypocenter and its hardening to the east. Such a state of the lithospheric medium may indicate the presence of a deformation shadow zone in the Chiapas earthquake preparation area.

KEYWORDS: Middle America Trench; the 2017 Chiapas earthquake in Mexico; Cocos plate; seismotectonic deformation; earthquake focal mechanism; Benioff zone

FUNDING: The study received a partial financial support from the RFBR (project 17-05-01234) and the BRF (projects 0331-2019-0006 and 0331-2019-0012).

FUNDING: This study was carried out under the state assignment (projects 0331-2019-0006 and 0331-2019-0012) and financially supported by RFBR (project 17-05-01234).

RESEARCH ARTICLE

Received: December 1, 2019

Revised: March 4, 2020

Accepted: March 11, 2020

FOR CITATION: Dyadkov P.G., Kuchay O.A., Romanenko Y.M., Dzhumagaliyeva Z.S., 2020. Deformations in the Middle America Trench according to earthquake focal mechanisms and their features in the area of the 2017 M_w 8.2 Chiapas earthquake, Mexico. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (2), 320–333. doi:10.5800/GT-2020-11-2-0477

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРАЛЬНО-АМЕРИКАНСКОЙ ЗОНЕ СУБДУКЦИИ ПО ДАННЫМ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ИХ ОСОБЕННОСТИ В РАЙОНЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ЧЬЯПАС, МЕКСИКА, 2017 г., $M_w=8.2$

П.Г. Дядьков, О.А. Кучай, Ю.М. Романенко, З.С. Джумагалиева

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

АННОТАЦИЯ. Сейсмоструктурные деформации в Центрально-Американской зоне субдукции и их особенности в районе подготовки землетрясения Чьяпас, $M_w=8.2$, 8.09.2017 г., определены по данным о 2244 механизмах очагов землетрясений за период 1977–2017 гг. Детально изучено распределение сейсмичности с глубиной. Уменьшение глубины распространения зоны Бенъофа в северо-западных сегментах субдукции и увеличение в юго-восточных связываются с возрастом субдуцирующих частей плиты Кокос и углом их погружения. Последний механизм может объяснять также факт наличия землетрясений со сбросовыми подвижками на океаническом поднятии Центрально-Американской зоны субдукции в юго-восточных сегментах и их отсутствие в северо-западных. В целом характерный для зон субдукции тип деформирования среды имеет в Центрально-Американской зоне субдукции ряд особенностей. Преобладание на глубинах до 35 км укорочения по горизонтальным компонентам и удлинения по вертикальной сменяется в интервале глубин 36–70 км переходным типом с мозаичным распределением деформаций разного знака и еще ниже, в диапазоне глубин 70–105 км, характеризуется противоположным по отношению к верхнему горизонту типом деформаций. Землетрясение Чьяпас произошло на границе областей с разным типом деформирования, что свидетельствует о наличии условий разупрочнения блочной среды к западу от гипоцентра и ее стеснения к востоку. Подобный характер состояния среды может указывать на наличие зоны деформационной тени в области подготовки землетрясения Чьяпас.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Центрально-Американская зона субдукции; землетрясение Чьяпас 2017 г. в Мексике; плита Кокос; сейсмоструктурная деформация; механизм очага землетрясения; зона Бенъофа

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках Госзадания (проекты 0331-2019-0006, 0331-2019-0012) и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-01234).

1. ВВЕДЕНИЕ

В Центрально-Американской зоне субдукции в 2017–2018 гг. произошло три сильных землетрясения (рис. 1). Первое из них – землетрясение Чьяпас 8 сентября 2017 г. с $M_w=8.2$ – было сильнейшим в этом регионе за последние 100 с лишним лет. Два других, последовавших за ним, 19 сентября 2017 г. и 16 февраля 2018 г., имели существенно более низкие магнитуды – $M_w=7.1$ и 7.2 . Такие события здесь происходят относительно часто – в среднем два за пять лет [Bulletin of the International Seismological Centre..., 2019].

Параметры этих землетрясений были следующие [USGS Earthquake Hazards Program, 2017]:

- землетрясение Чьяпас произошло в районе залива Теуантепек 8 сентября 2017 г., $\varphi = 15.022^\circ$, $\lambda = -93.899^\circ$, $M_w = 8.2$, $H = 47$ км [USGS Earthquake Hazards Program, 2017];

- эпицентр землетрясения 19 сентября 2017 г. находился в пределах Мексиканского нагорья вблизи г. Мехико, $\varphi = 18.55^\circ$, $\lambda = -98.489^\circ$, $M_w = 7.1$, $H = 48$ км;

- землетрясение 16 февраля 2018 г. произошло в горах Южные Сьерра Мадре, $\varphi = 16.386^\circ$, $\lambda = -97.979^\circ$, $M_w = 7.2$, $H = 22$ км [Ye et al., 2017].

В очаге сильнейшего землетрясения Чьяпас (8 сентября 2017 г.) сбросовая подвижка произошла по крутой плоскости [USGS Earthquake Hazards Program, 2017]

(рис. 1). Протяженность очага по горизонтали оценивается в 180 км [Ye et al., 2017]. Землетрясение 19 сентября 2017 г. характеризовалось также сбросовой подвижкой по плоскости, падающей под углом 47° . При землетрясении 16 февраля 2018 г. произошла надвиговая подвижка.

Представляет большой интерес рассмотрение особенностей характера деформирования среды на разных глубинах на участках зоны субдукции, где готовилось землетрясение Чьяпас и последовавшие за ним события.

Для достижения этой цели в работе выполнен расчет сейсмоструктурных деформаций (СТД) по имеющимся к настоящему времени определениям механизмов очагов землетрясений, количество которых с 1977 г. по 7 сентября 2017 г. (до землетрясения Чьяпас) насчитывает более двух тысяч определений для всей Центрально-Американской зоны субдукции, включая границы плиты Кокос.

Подобный анализ для всей зоны субдукции ранее не проводился. Как правило, работы, посвященные изучению напряженного состояния и характера деформаций в этом регионе, охватывают не весь регион, а его части. Механизмы очагов северо-западной (мексиканской) части этой зоны субдукции рассматривались в работах [Ramírez-Gaytán et al., 2015; Pardo, Sufirez, 1995; Santoyo

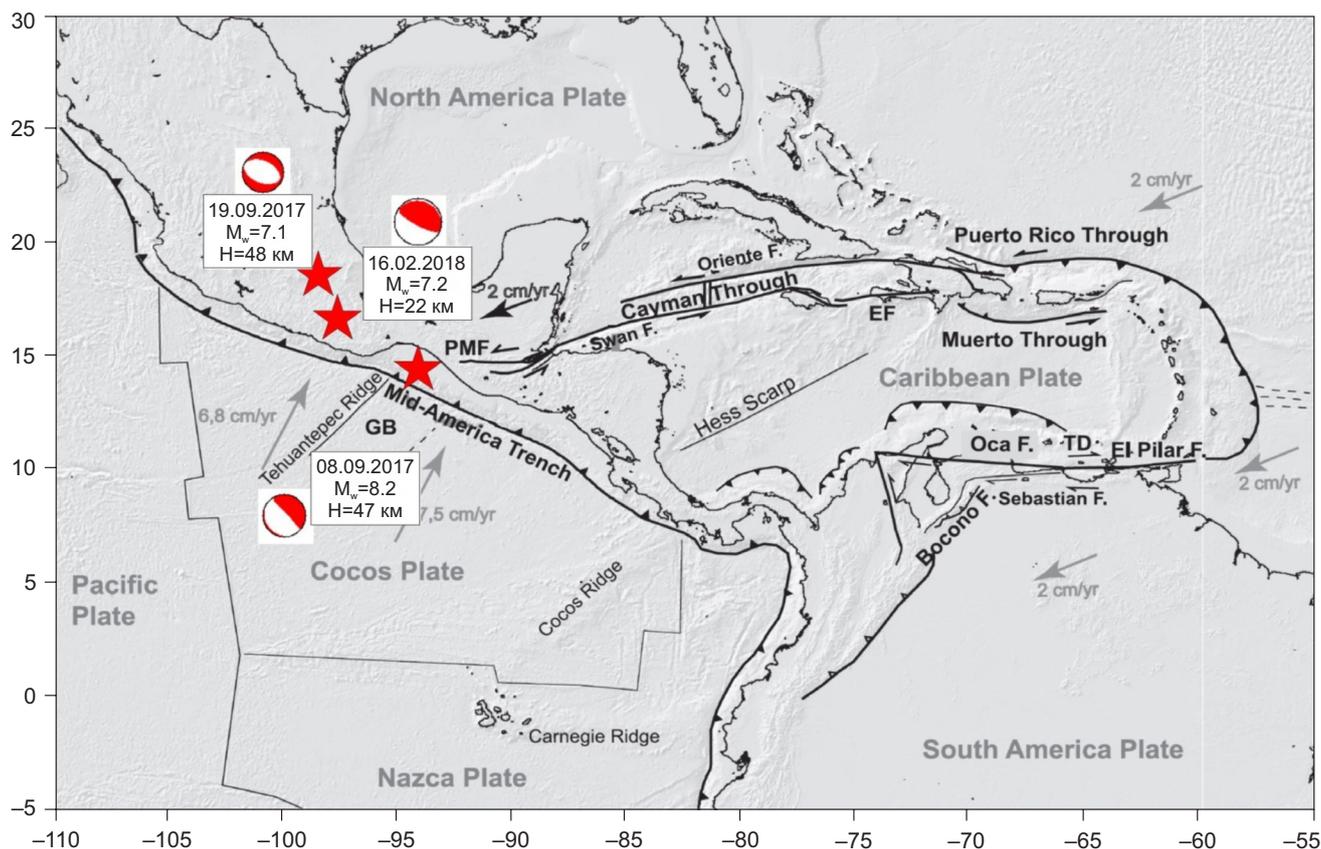


Рис. 1. Расположение эпицентров землетрясений (красные звездочки) 8 сентября 2017 г. (землетрясение Чьяпас, $M_w=8.2$), 19 сентября 2017 г. ($M_w=7.1$) и 16 февраля 2018 г. ($M_w=7.2$) в зоне контакта плиты Кокос с Северо-Американской и Карибской плитами. Стереогаммы механизмов их очагов располагаются на тектонической схеме [Franco et al., 2012].

Fig. 1. Locations of earthquake epicenters (red stars) that occurred on September 08, 2017 (Chiapas earthquake $M_w=8.2$), September 19, 2017 ($M_w=7.1$), and February 16, 2018 ($M_w=7.2$) in the contact zone of the Cocos plate with the North American and Caribbean plates. The stereograms of the focal mechanisms are shown in the tectonic map [Franco et al., 2012].

et al., 2006; Cáceres, 2003], а работы [Alvarado et al., 2017; Franco et al., 2012; Ye et al., 2013] были посвящены изучению юго-восточной ветви, иногда называемой гватемальской. Наиболее интересный для нас район подготовки землетрясения Чьяпас в этих работах приурочен, как правило, к границе участков исследований. Это определяет актуальность изучения сеймотектонических деформаций в Центрально-Американской зоне субдукции в целом, что позволит, в том числе, изучить их особенности в области подготовки землетрясения Чьяпас – в районе залива Теуантепек.

2. ОСОБЕННОСТИ ТЕКТОНИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И СЕЙСМИЧНОСТЬ

К особенностям тектонического строения района очага самого сильного за последние десятилетия землетрясения (8 сентября 2017 г., $M_w=8.2$) можно отнести его пространственную приуроченность, во-первых, к стыку Северо-Американской и Карибской плит на их границах с погружающейся под них плитой Кокос и, во-вторых, к контакту хребта Теуантепек, наиболее выраженного тектонического элемента в пределах плиты Кокос, с зоной субдукции. Вдоль зоны контакта плиты

Кокос с Северо-Американской и Карибской плитами проходит Центрально-Американский глубоководный желоб от полуострова Калифорния до Панамского перешейка. Скорость смещения плиты Кокос в северо-восточном направлении составляет 7.6 см/год [Ellis et al., 2018]. Пограничные области плиты Кокос являются сейсмически активными, но наибольшее количество землетрясений сосредоточено в зоне конвергентной границы Северо-Американской и Карибской плит с плитой Кокос (рис. 1). [Ye et al., 2013; Ambraseys, Adams, 1996; Anderson et al., 1989; Wang et al., 1982].

Особенности погружения субдуцирующей плиты Кокос могут создавать несколько разные условия для формирования очагов землетрясений, и поэтому механизмы очагов землетрясений и, соответственно, сеймотектонические деформации объемов горных масс должны отличаться. Знание этих особенностей будет приближать нас к пониманию физической природы сейсмического процесса в этом регионе.

Для анализа сейсмичности использованы профили распределения землетрясений по глубине, построенные нами вкрест Центрально-Американского желоба (рис. 2) по данным каталога [USGS Earthquake Hazards

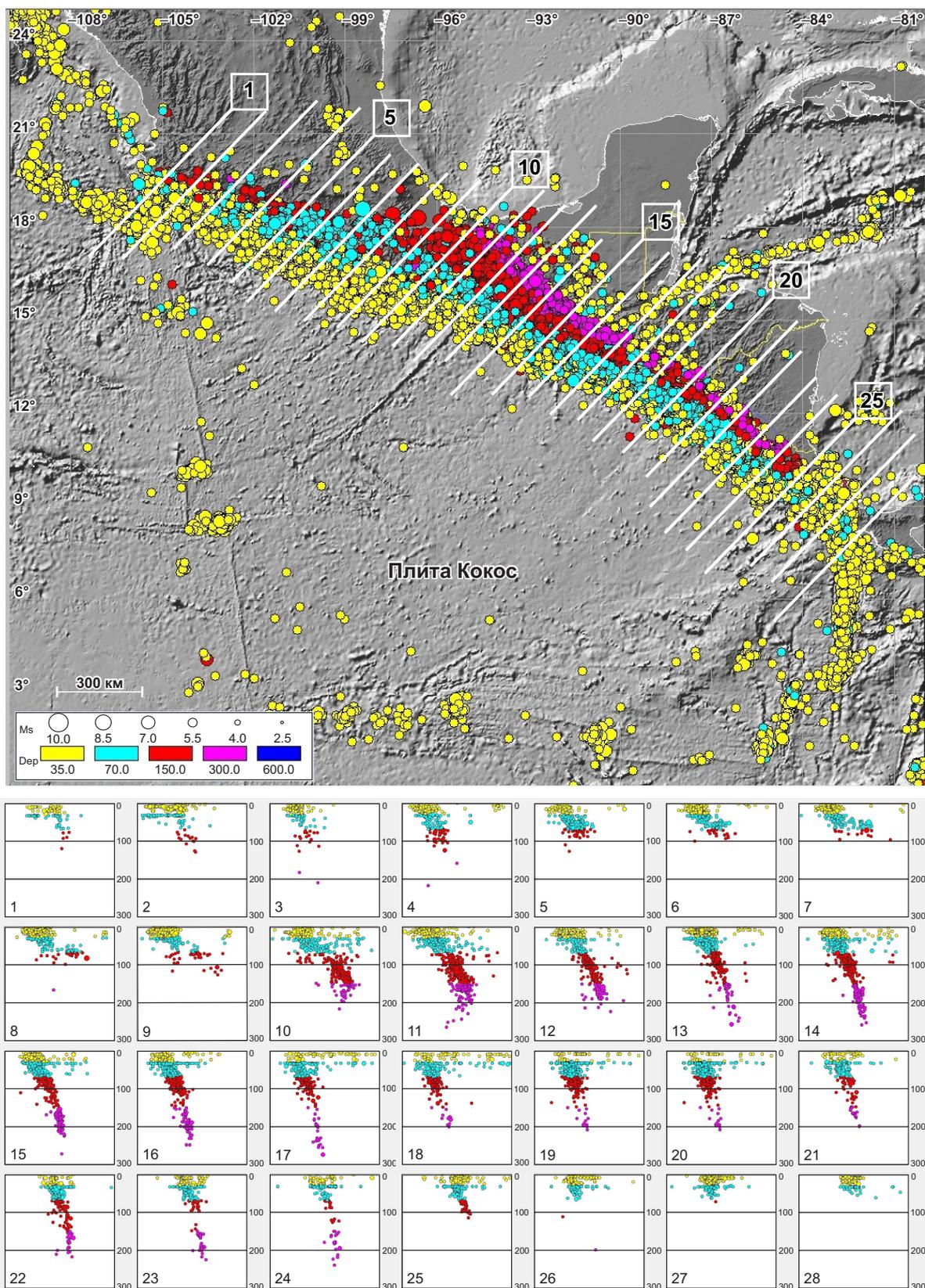


Рис. 2. Распределение землетрясений по глубине в зоне конвергентной границы плиты Кокос с Северо-Американской и Карибской плитами (верхний рисунок) и разрезы вкрест простирания Центрально-Американского желоба. Цифрами обозначены номера разрезов.

Fig. 2. Depth distribution of earthquakes in the area of the convergent boundary of the Cocos plate with the North American and Caribbean plates (upper figure) and sections across the strike of the Middle America Trench. Numbers indicate the section numbers.

Program, 2017] за период наблюдения с 1973 по 2017 г. с $M \geq 4$. Для построения использована геоинформационная система EEDB [Dyadkov, Mikheeva, 2010; Mikheeva et al., 2014]. Кроме этого, были привлечены материалы статей [Benz et al., 2011; Kim et al., 2010; Stubailo et al., 2012].

При совместном анализе выявлено существенное изменение максимальной глубины распространения сейсмичности. В северо-западном направлении от залива Теуантепек субдукционная сейсмичность имеет место до глубин 100–130 км. В этой части зоны субдукции отмечается пологое погружение плиты Кокос под Северо-Американскую плиту на расстояние до 250–300 км от желоба [Manea V.C., Manea M., 2011; Stubailo et al., 2012; Pérez-Campos et al., 2008], после чего она круто опускается более чем на 500 км, но при этом отмечается отсутствие проявления сейсмичности на этих глубинах. В то же время в юго-восточном направлении от залива Теуантепек субдукционная сейсмичность достигает глубин 200–300 км. В этой части, которая протягивается на 1200 км, наблюдается более крутое погружение плиты Кокос, чем к северо-западу от залива [Kyriakopoulos et al., 2015; Ranero et al., 2005].

По-видимому, основной причиной разной глубины распространения сейсмичности является величина наклона погружающейся плиты и, вследствие этого, постепенный переход от возможности накопления упругих деформаций к пластическому и вязкому течению в результате длительного прогрева. Т.е., вследствие того, что скорость движения плиты Кокос на всем протяжении Центрально-Американской зоны субдукции примерно

одинаковая, на участках крутого погружения плита за одно и то же время, требуемое для высокой степени прогрева, достигает больших глубин при крутом погружении, чем при пологом. Кроме этого, важную роль играет зрелость океанической литосферы [Khain, Lomize, 1995]. Северо-западная часть плиты Кокос в районе глубоководного желоба более молодая, поскольку она ближе к оси спрединга, чем юго-восточная часть.

3. МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Прежде всего рассмотрим распределение типов подвижек в очагах землетрясений в зоне контакта плиты Кокос с Северо-Американской и Карибской плитами в интервалах глубин 1–35 км и 36–70 км.

Землетрясения из каталогов международного сейсмологического центра ISC для событий с $M_w = 4.6 - 8.0$ [Bulletin of the International Seismological Centre..., 2019] были разделены на два типа. Первый тип состоит из землетрясений с надвиговой и сдвиго-надвиговой подвижкой в очаге, второй – со сбросовой и сдвиго-сбросовой подвижкой. В распределении этих сейсмических событий наблюдаются следующие особенности. В диапазоне глубин 1–35 км в Центрально-Американской зоне субдукции возникают в основном землетрясения только с надвиговыми и сдвиго-надвиговыми подвижками в очагах (рис. 3).

В следующем диапазоне глубин, 36–70 км, к северо-западу от залива Теуантепек по границе с Северо-Американской плитой преобладают сбросовые и сдвиго-сбросовые подвижки в очагах [Stubailo et al., 2012].

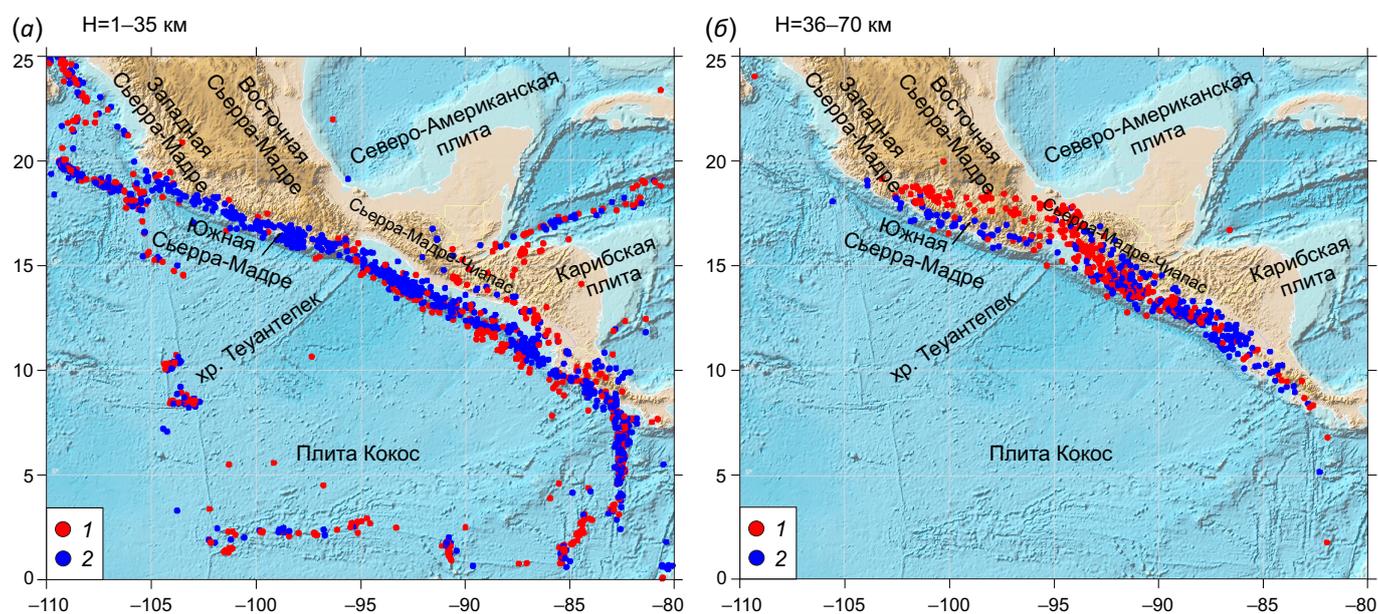


Рис. 3. Типы подвижек в очагах землетрясений за период 1977–2017 гг. до землетрясения Чьяпас в диапазоне глубин 1–35 км (а) и 36–70 км (б).

1 – эпицентры со сбросовыми и сдвиго-сбросовыми подвижками в очагах землетрясений, 2 – с надвиговыми и сдвиго-надвиговыми подвижками.

Fig. 3. Types of movements in the earthquake foci in the depth ranges of 1–35 km (a) and 36–70 km (b) in the period of 1977–2017 before the Chiapas earthquake.

Epicenters of earthquakes: 1 – normal and shear-normal movements, 2 – thrust and shear-thrust movements.

К юго-востоку, в зоне поддвига плиты Кокос под Карибскую плиту, на этих глубинах наблюдается мозаичное распределение механизмов как со сбросовым, так и со взбросовым типом подвижек.

Важной особенностью механизмов очагов в юго-восточной части зоны субдукции является наличие сбросовых подвижек в диапазоне глубин 1–35 км в области океанического поднятия, в так называемой области «outer-rise seismicity», расположенной в верхней части океанической плиты в месте ее изгиба перед опусканием в глубоководный желоб. Эпицентры этих событий протягиваются узкой полосой вдоль океанического желоба практически на всем протяжении контакта плиты Кокос с Карибской плитой (рис. 3, а). Мы связываем наличие этих событий с более крутым погружением этой части плиты Кокос (см. рис. 2), где создаются условия для возникновения зоны растяжения [Lefeldt, Greve-meyer, 2008].

4. СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ

В связи с тем, что плита Кокос на северо-востоке граничит с двумя литосферными плитами, деформации в зоне контакта имеют многочисленные особенности, поэтому остановимся на наиболее общих чертах СТД, но сначала кратко изложим методику их расчета.

Методика расчета сейсмоструктурных деформаций. Для расчета сейсмоструктурного деформирования объемов горных масс использовалась методика, основанная на работах Ю.В. Ризниченко [Riznichenko, 1985], Б.В. Кострова [Kostrov, 1975], С.Л. Юнги [Yunga, 1990], Ю.Л. Ребецкого [Rebetsky, 2007; Rebetsky et al., 2012, 2013; Rebetsky, Polets, 2014], которая применялась в работах [Gol'din, Kuchai, 2007; Kuchay et al., 2015, 2018; Kuchai, Kozina, 2015; Dyadkov et al., 2017; Bushenkova et al., 2018]. Были рассчитаны СТД по данным механизмов очагов землетрясений. СТД представляют собой деформирование объемов горных масс при смещениях частиц среды по разноориентированным разрывам в очагах землетрясений. Они определяются как сумма тензоров сейсмических моментов всех землетрясений, возникших в единице объема за определенный промежуток времени:

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

где $Q_{lm}^{(n)}$ – тензор малой деформации, μ – модуль сдвига, V – объем осреднения, $M_o^{(n)}$ – величина сейсмического момента n -го землетрясения, определяемая по известной корреляционной зависимости [Riznichenko, 1985].

Восстановление поля СТД осуществлялось по данным 2244 механизмов очагов землетрясений, произошедших в районе исследования за период с 1977 г. по сентябрь 2017 г., т.е. до сильнейшего землетрясения 8 сентября 2017 г. Для этого привлекались данные каталога [Bulletin of the International Seismological Centre..., 2019]. Неравномерное распределение очагов землетрясений [Ramírez-Gaytán, 2015] в пределах территории с координатами $\varphi = 0-25$ °с.ш. и $-110... -80$ °з.д. потребовало

выбора размера площадок осреднения в 1° по широте и долготе. Разделение сейсмоактивного слоя осуществлялось на слои 0–35 км, 35–70 км, 70–105 км, 105–170 км и 170–250 км. Мощность слоя определялась наличием материала о механизмах очагов землетрясений. При разбиении на слои учитывалась глубина очагов, полученная при расчете механизмов землетрясений из каталога [Bulletin of the International Seismological Centre..., 2019]. Расчеты компонент деформаций для ячеек осреднения проводились методом скользящего окна с шагом 0.5° . В пределах каждого элементарного объема рассчитывались величины компонент в географической системе координат. Строились карты широтной, меридиональной и вертикальной компонент СТД. При построении карт учитывался знак деформаций, т.е. относительные удлинения и укорочения объемов горных масс. Было принято, что положительные значения деформаций соответствуют относительному удлинению, отрицательные – относительному укорочению линейных размеров элементарных объемов.

Сейсмоструктурные деформации в диапазоне глубин 1–35 км восстановлены по данным 1696 механизмов очагов землетрясений. Из анализа материала следует, что в поле широтной (E_{xx}) компоненты объемы земной коры испытывают преимущественно деформации укорочения в пределах Центрально-Американского глубоководного желоба при контакте литосферной плиты Кокос с Северо-Американской и Карибской плитами (рис. 4). Отдельные участки удлинения по E_{xx} имели место на восточном окончании гор Сьерра-Мадре, в районе очага землетрясения Чьяпас 8 сентября 2017 г. и вдоль всей восточной части поднятия от желоба к океану.

Поле меридиональной (E_{yy}) компоненты деформаций более однородно на этих глубинах с преобладающими отрицательными значениями. Участки с положительными значениями, так же как в случае с E_{xx} , присутствуют вдоль внешней границы Центрально-Американского желоба при контакте плиты Кокос с Карибской и оконтуривают плиту Кокос на юге и востоке. В поле вертикальной компоненты восстанавливаются в основном деформации вертикального удлинения. В районах пологого погружения плиты Кокос (от -104 до -98 °з.д) деформации вертикального укорочения отсутствуют. Далее к юго-востоку (от -98° з.д) угол ее погружения становится более крутым (см. рис. 2) и вдоль юго-восточной части желоба с его внешней стороны имеют место деформации вертикального сокращения объемов горных масс. Эти области вертикального сокращения соответствуют зоне крутого изгиба погружающегося слэба, так называемой области «outer-rise seismicity». В районе южной части желоба плита Кокос вновь погружается полого (см. рис. 2), и здесь также отсутствуют деформации вертикального укорочения (рис. 4).

Сейсмоструктурные деформации в диапазоне глубин 36–70 км восстановлены по данным механизмов очагов 405 сейсмических событий. Большая часть землетрясений регистрируется вдоль конвергентной

границы плиты Кокос с Карибской и Северо-Американской плитами. При расчете СТД получено, что объемы горных масс испытывают преимущественно широтное удлинение (E_{xx}) при контакте плит Кокос и Северо-Американской. При контакте плиты Кокос с Карибской

широтное удлинение сменяется в основном широтным укорочением и далее к юго-востоку наблюдается чередование областей удлинений и укорочений. Поля меридиональной и вертикальной компонент сейсмотектонических деформаций неоднородны. Происходит

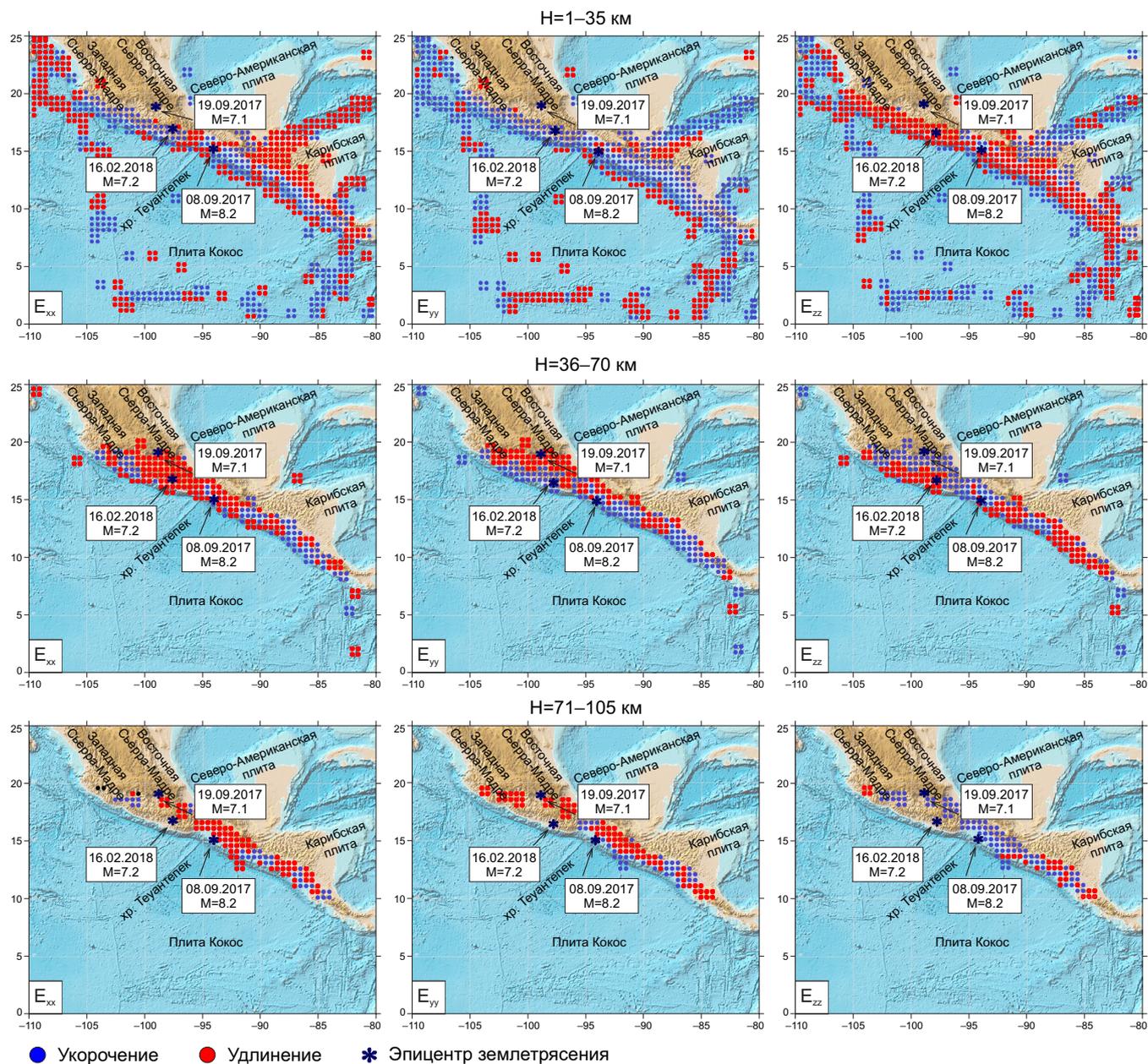


Рис. 4. Широтная (E_{xx}), меридиональная (E_{yy}) и вертикальная (E_{zz}) компоненты сейсмотектонических деформаций, рассчитанные по данным механизмов очагов землетрясений ($M > 4.6$), произошедших с 1977 г. до 8 сентября 2017 г. в диапазоне глубин 1–35 км, 36–70 км, 71–105 км.

Колонка слева – поле широтной компоненты, колонка в центре – поле меридиональной компоненты, колонка справа – поле вертикальной компоненты. Синим цветом обозначены области укорочения, красным – области удлинения в соответствующих направлениях. Звездочками обозначены эпицентры землетрясений 8 и 19 сентября 2017 г. и 16 февраля 2018 г.

Fig. 4. Latitudinal (E_{xx}), meridional (E_{yy}) and vertical (E_{zz}) components of seismotectonic deformations calculated according to earthquake focal mechanisms ($M > 4.6$) that occurred from 1977 to September 8, 2017 in the depth ranges of 1–35 km, and 71–105 km.

Left column – field of the latitudinal component; center – field of the meridional component; right – field of the vertical component. Colour codes of cells: blue – areas of shortening, red – areas of elongation in the corresponding directions. Stars – epicenters of the earthquakes on September 8 and 19, 2017 and February 16, 2018.

укорочение объемов горных масс в меридиональном направлении, в основном в пределах Центрально-Американского желоба, а северо-восточнее желоба – деформации удлинения. Поле вертикальной компоненты характеризуется деформациями удлинения на тех участках, где по компоненте E_{yy} наблюдается укорочение. На юго-восток от залива Теуантепек преобладает вертикальное удлинение (рис. 4).

Сейсмотектонические деформации в диапазоне глубин 71–105 км восстановлены по данным механизмов очагов 144 землетрясений. Основная масса сейсмических событий сосредоточена на границе литосферной плиты Кокос с Карибской и Северо-Американской. На этих глубинах, особенно в центральной части изучаемой области субдукции, в горизонтальных компонентах преобладают деформации удлинения, а в вертикальной – укорочения. Исключением является область севернее залива Теуантепек от ~ 94 до 96° з.д. (район землетрясения Чьяпас 8 сентября 2017 г.), где по меридиональной компоненте E_{yy} наблюдается укорочение. Более мозаичное распределение знаков всех трех компонент сейсмотектонической деформации наблюдается на северо-западном окончании Центрально-Американской

зоны субдукции и в области контакта плиты Кокос с Карибской плитой. Землетрясение 19 сентября 2017 г. с $M_w = 7.1$ и $H = 48$ км произошло в области однородной деформации удлинения по обеим горизонтальным осям, имевшей место в пределах интервала глубин 36–105 км (рис. 4).

Карты максимальных значений компонент тензора СТД. Для построения карты максимальных значений компонент тензора сейсмотектонических деформаций были обработаны данные за период 1977–2017 гг. для диапазона глубин 1–35 км и 36–70 км. По рассчитанным сейсмотектоническим деформациям в каждой элементарной ячейке из трех диагональных компонент тензоров деформаций (E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}), полученных в географической системе координат, выбирались компоненты с максимальными значениями по модулю и на карты наносились ячейки с максимальными значениями, но с учетом знака деформации.

Для глубин 1–35 км в пределах Центрально-Американской зоны субдукции преобладают деформации максимального вертикального удлинения и фрагментарного меридионального укорочения. Вдоль внешней границы юго-восточной части наблюдаются максимальные

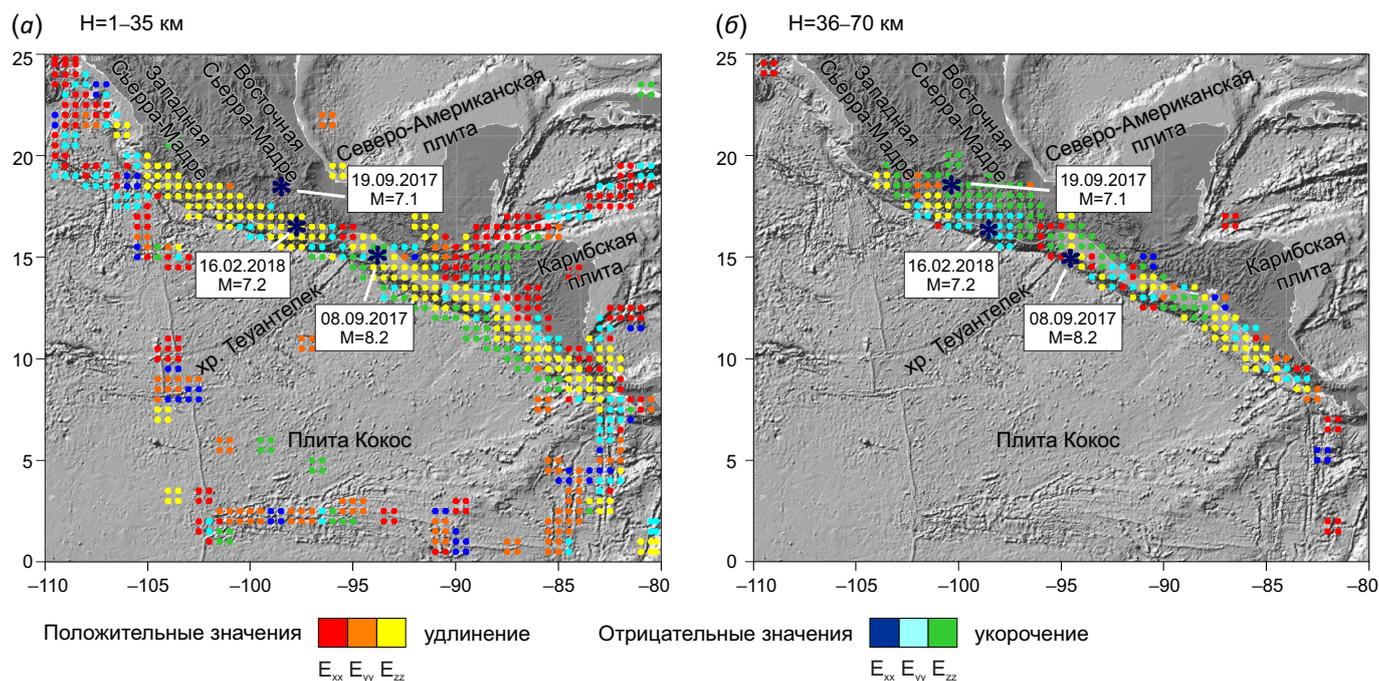


Рис. 5. Карта максимальных значений по абсолютной величине одной из трех компонент тензора сейсмотектонических деформаций в каждой ячейке для диапазонов глубин 1–35 км (а) и 36–70 км (б) за период 1977–2017 гг. (до землетрясения Чьяпас).

Красным цветом обозначено максимальное удлинение в широтном направлении, оранжевым – в меридиональном, желтым – в вертикальном. Синим цветом обозначено максимальное значение укорочения в широтном направлении, голубым – в меридиональном и зеленым – в вертикальном. Звездочками темного цвета отмечены эпицентры землетрясений 8 и 19 сентября 2017 г. и 16 февраля 2018 г.

Fig. 5. Map of maximum (absolute) values of one of the three components of the seismotectonic deformation tensor in each cell at the depth ranges of 1–35 km (a) and 36–70 km (b) for the period of 1977–2017 before the Chiapas earthquake.

Maximum elongation and its direction: red – latitudinal, orange – meridional, yellow – vertical. Maximum shortening and its direction: dark blue – latitudinal, light blue – meridional, green – vertical. Dark stars – epicenters of the earthquakes on September 8 and 19, 2017 and February 16, 2018.

вертикальные укорочения, что соответствует области так называемой «outer-rise seismicity». Землетрясение 16 февраля 2018 г. ($H = 22$ км), зарегистрированное в слое 1–35 км, произошло в районе максимального вертикального удлинения объемов земной коры. Эпицентр землетрясения Чьяпас 8 сентября 2017 г. зафиксирован на границе областей максимального вертикального укорочения и максимального вертикального удлинения (рис. 5).

В диапазоне глубин 36–70 км вдоль Центрально-Американской зоны субдукции наблюдается чередование областей максимальных меридиональных и вертикальных укорочений, а также максимальных вертикальных удлинений. Землетрясение 19 сентября 2017 г. произошло в однородной области максимальных вертикальных укорочений, тогда как в районе землетрясения Чьяпас имеет место мозаичный характер распределения максимальных деформаций.

Характер деформирования среды в горизонтальной плоскости в соответствии с возможными комбинациями знаков E_{xx} и E_{yy} . Цель построения таких карт – определение состояния сейсмогенной среды. Удлинение в горизонтальной плоскости по обеим осям (положительные E_{xx} и E_{yy}) может свидетельствовать о разупрочнении блочной среды, тогда как укорочение (отрицательные E_{xx} и E_{yy}) может являться признаком ее стеснения и консолидации. Под разупрочнением

блочной среды будем понимать ослабление межблочных связей, которое может выражаться, например, в понижении жесткости межблочных контактов. Район землетрясения имеет характерные особенности в распределении значений этого параметра на глубинах как 1–35 км, так и 36–70 км. К северо-западу от очага этого землетрясения мы наблюдаем зону всестороннего горизонтального удлинения, секущую зону субдукции (рис. 6, а). В верхней части разреза это единственное место на всем протяжении Центрально-Американской зоны субдукции. Инициация землетрясения Чьяпас произошла в слое 36–70 км на глубине 47 км на границе обширной области всестороннего горизонтального удлинения (к северу, северо-западу) и области с деформациями разного знака по E_{xx} и E_{yy} (рис. 6, б). Эти факты могут указывать на наличие зоны разупрочнения блочной среды в районе землетрясения Чьяпас, которая может являться зоной деформационной тени и играть важную роль в формировании условий подготовки этого сильнейшего землетрясения.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Детальный анализ пространственного распределения сейсмичности (см. рис. 2), механизмов очагов землетрясений и сеймотектонических деформаций в Центрально-Американской зоне субдукции за период 1977–2017, предшествующий сильнейшему землетрясению

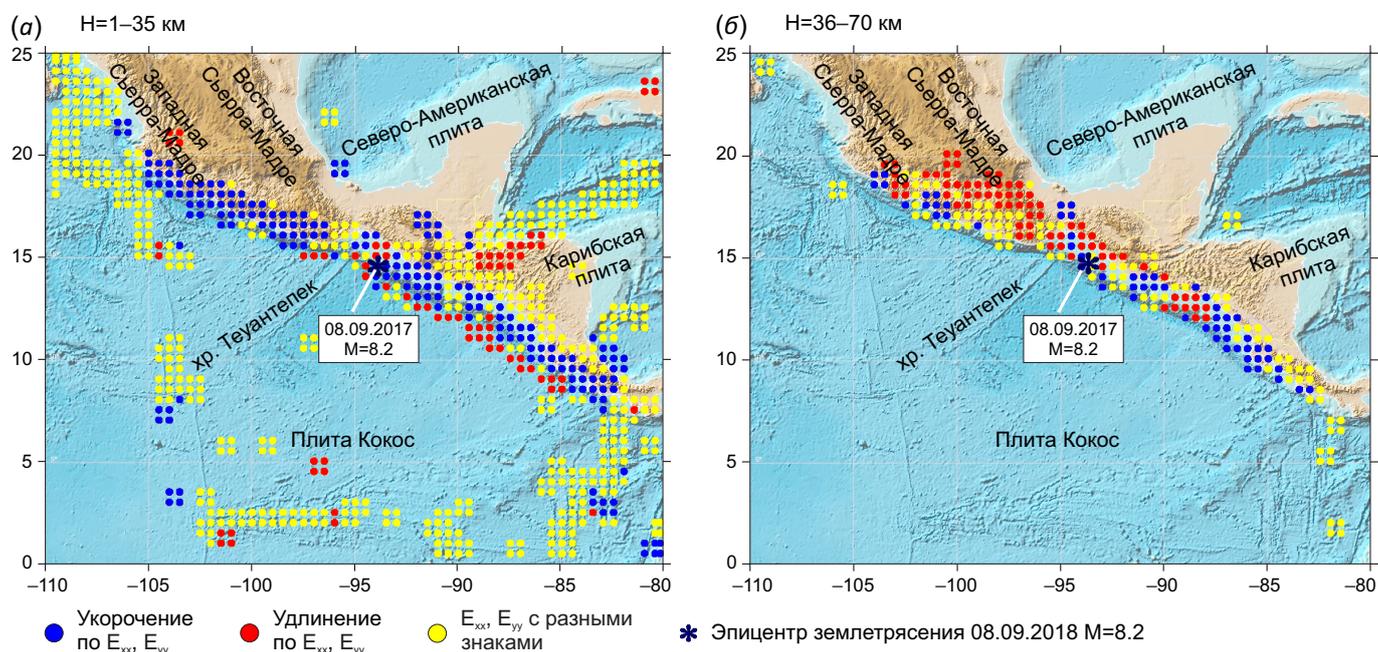


Рис. 6. Характер деформаций в горизонтальной плоскости в соответствии с возможными комбинациями знаков E_{xx} и E_{yy} . Синим цветом обозначены ячейки, в которых E_{xx} и E_{yy} имеют отрицательный знак (укорочение), красным – положительный знак (удлинение), желтым цветом – компоненты E_{xx} и E_{yy} с разными знаками. Поля горизонтальных компонент (E_{xx} и E_{yy}) сеймотектонических деформаций определены по данным механизмов очагов землетрясений, произошедших в период с 1977 г. по 8 сентября 2017 г. в диапазоне глубин 1–35 км (а) и 36–70 км (б).

Fig. 6. Deformations in the horizontal plane in accordance with possible combinations of E_{xx} and E_{yy} signs. Colour codes of cells: blue – negative E_{xx} and E_{yy} (shortening), red – positive E_{xx} and E_{yy} (lengthening), yellow – components E_{xx} and E_{yy} with different signs. The fields of the horizontal components (E_{xx} and E_{yy}) of seismotectonic deformations were determined according to the focal mechanisms earthquakes that occurred from 1977 to September 8, 2017 in the depth ranges of 1–35 km (a) and 36–70 km (b).

Чьяпас 8 сентября 2017 г. с $M_w = 8.2$, позволяет выделить ряд следующих особенностей.

Во-первых, анализ распределения гипоцентров землетрясений ($M \geq 4$) выявил неглубокое расположение зоны Беньофа (до ~ 100 км) в северо-западной части Центрально-Американской зоны субдукции по границе плиты Кокос с Северо-Американской плитой и их углубление до 200–300 км в юго-восточном направлении от залива Теуантепек, вдоль контакта плиты Кокос с Карибской плитой вплоть до южного окончания последней (см. рис. 2).

Во-вторых, сейсмичность в области океанического поднятия (outer-rise seismicity), характеризующаяся сбросовыми подвижками в очагах землетрясений (см. рис. 3) и деформациями удлинения по горизонтальным осям, проявляется только в юго-восточном направлении от залива Теуантепек и практически отсутствует к западу.

Как мы полагаем, оба вышеуказанных факта обусловлены, во-первых, более пологим углом погружения плиты Кокос в северо-западной части по сравнению с юго-восточной и, во-вторых, более молодым возрастом северной части плиты Кокос.

По всей видимости, реологический переход в среде слэба от преобладания упругого деформирования к вязкопластическому будет зависеть от времени его прогресса, и при пологом погружении этот момент наступит на меньших глубинах, чем при крутом погружении. Определенную роль может играть и возраст погружающихся сегментов плиты Кокос [Khain, Lomize, 1995].

Отсутствие землетрясений со сбросовыми подвижками на океаническом поднятии при пологом погружении плиты Кокос [Manea V.C., Manea M., 2011; Pérez-Campos et al., 2008] и их присутствие при крутом погружении могут объясняться тем, что интенсивность напряжений растяжения в верхней части слэба в месте ее перегиба перед глубоководным желобом определяется крутизной угла погружения плиты [Stubailo et al., 2012; Alvarado et al., 2017].

Рассмотрим теперь основные закономерности сейсмотектонических деформаций в Центрально-Американской зоне субдукции и их особенности в районах подготовки сильнейшего землетрясения Чьяпас с $M_w = 8.2$ и последовавших за ним двух гораздо более слабых событий с $M_w = 7.1$ и $M_w = 7.2$ 19 сентября 2017 г. и 16 февраля 2018 г.

Характерная для зон субдукции закономерность преобладания деформаций укорочения вкрест простирающегося глубоководного желоба имеет ряд особенностей в Центрально-Американской зоне субдукции.

Если в верхней части разреза в диапазоне глубин 1–35 км имеют место условия близгоризонтального укорочения, то ниже, на глубинах 36–70 км, особенно в западной части, начинают преобладать условия близгоризонтального удлинения. Еще ниже, в диапазоне глубин 71–105 км, наблюдается абсолютное преобладание близгоризонтальных удлинений и вертикальных укорочений, за исключением небольшой области к

западу от очага землетрясения Чьяпас, в которой имеют место деформации меридионального укорочения.

Перейдем к анализу СТД объемов горных масс эпицентральных областей будущих землетрясений 8 и 19 сентября 2017 г. и 16 февраля 2018 г. Отметим, что относительно более слабые землетрясения 19 сентября 2017 г. ($H = 47$ км, $M_w = 7.1$) и 16 февраля 2018 г. ($H = 22$ км, $M_w = 7.2$) произошли в однородном поле СТД при широтном и меридиональном удлинении и вертикальном укорочении в первом случае и при широтном и меридиональном укорочении и вертикальном удлинении во втором (см. рис. 4).

Что касается землетрясения Чьяпас 8 сентября 2017 г., $M_w = 8.2$, то вначале следует отметить особенности тектонической структуры района его подготовки. Землетрясение произошло в области контакта трех тектонических плит – Кокос, Карибской и Северо-Американской. Кроме того, к району очага этого землетрясения примыкает наиболее существенная неоднородность в пределах плиты Кокос – хребет Теуантепек. При этом эпицентральная область землетрясения Чьяпас приурочена к сегменту зоны субдукции с глубоким распространением сейсмичности (до ~ 300 км) в отличие от соседних с ним западных сегментов.

Основной особенностью в полях компонент сейсмотектонической деформации является то, что очаг землетрясения Чьяпас возник на границе областей с вертикальным удлинением с востока и вертикальным укорочением с запада (см. рис. 4, интервал глубин 36–70 км). Ниже, на глубинах 71–105 км, при общем преобладании деформаций удлинения как по E_{xx} , так и по E_{yy} и однородном вертикальном укорочении во всей центральной части этой зоны субдукции, к западу от эпицентра землетрясения Чьяпас существует аномальная локальная область шириной ~ 200 км, которая характеризуется деформациями укорочения по меридиональной компоненте E_{yy} .

Фактически во всех трех диапазонах глубин существуют аномалии к западу от эпицентра этого землетрясения. Наиболее значительными из них являются следующие: на глубинах 1–35 км имеет место удлинение по широтной компоненте E_{xx} и локальные участки с удлинением по E_{yy} и укорочением по E_{zz} ; на глубинах 36–70 км – укорочение по вертикальной компоненте E_{zz} и на глубинах 71–105 км – область с укорочением по меридиональной компоненте E_{yy} .

В геомеханической интерпретации эти аномалии в поведении компонент тензора деформаций могут свидетельствовать как о неоднородности характера деформирования, так и о наличии условий для разрушения блочной среды в районе будущей сейсмодислокации землетрясения Чьяпас, особенно в диапазоне глубин 36–70 км, и наличии условий для стеснения среды в меридиональном направлении в нижнем диапазоне глубин – 71–105 км (см. рис. 4). Важно также подчеркнуть приуроченность гипоцентра землетрясения Чьяпас к границе массивов пород с разным типом деформирования, особенно по вертикальной оси на глубинах

36–70 км, что можно интерпретировать наличием условий стеснения массивов горных пород к востоку и условий разупрочнения к западу от места инициации дислокации.

Карта максимальных значений одной из трех компонент тензора сейсмотектонических деформаций (см. рис. 5) и карта, показывающая характер деформирования в горизонтальной плоскости по совпадению или отличию знаков деформаций E_{xx} и E_{yy} (рис. 6), также указывают как на наличие наиболее существенных неоднородностей в поле STD именно к западу от очага землетрясения Чьяпас, так и на наличие условий для разупрочнения блочной среды в этой области по сравнению с областью к востоку от очага. Следует отметить, что развитие деструктивного афтершокового процесса этого землетрясения происходило именно в северо-западном направлении от гипоцентра [Ye et al., 2017], в районе предполагаемого разупрочнения блочной среды. В определенной степени это согласуется с ситуацией распределения интенсивности касательных напряжений в области подготовки Суматра-Андаманского землетрясения 2004 г. с $M_w = 9.2$, где району эпицентра соответствовали высокие значения касательных напряжений, а дальнейшее развитие дислокации происходило по области с низкими значениями этих напряжений [Rebetsky, Marinin, 2006].

Ранее, в работе [Gol'din, Kuchai, 2007], были выделены постоянно существующие зоны деформационной тени, обусловленные наличием крупных жестких тектонических блоков в Алтае-Саянском регионе. В районе подготовки землетрясения Чьяпас могла формироваться зона деформационной тени, обусловленная как неоднородностью деформаций в области тройного сочленения плит Кокос, Северо-Американской и Карибской, которые имеют разное направление и скорости движения, так и зацепом на контакте между ними. Кроме того, в этом районе даже отдельные сегменты плиты Кокос, находящиеся по разную сторону от хребта Теуантепек, имеют несколько разную скорость субдукции [Ellis et al., 2018; Franco et al., 2012], что также могло являться одной из причин формирования зоны деформационной тени.

Таким образом, характер аномалий в полях сейсмотектонических деформаций в районе землетрясения Чьяпас указывает на наличие условий разупрочнения блочной среды к западу-северо-западу от эпицентра и условий ее стеснения к востоку от эпицентра. По всей видимости, формирование области разупрочнения в условиях преимущественного стеснения в зоне конвергенции плит, особенно в верхнем горизонте глубин, могло быть связано с возникновением зоны деформационной тени в районе подготовки землетрясения Чьяпас.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детальный анализ распределения сейсмичности ($M \geq 4$) выявил ее неглубокое (до ~100 км) распространение в северо-западной части Центрально-Американской зоны субдукции на контакте плиты Кокос с

Северо-Американской плитой и ее заглупление до 200–300 км в юго-восточном направлении от залива Теуантепек вдоль контакта плиты Кокос с Карибской плитой вплоть до южного окончания последней. Как этот факт, так и отсутствие землетрясений со сбросовыми механизмами в зоне океанического поднятия в северо-западной части Центрально-Американской зоны субдукции и их наличие в юго-восточной части могут объясняться гораздо более пологим углом погружения плиты Кокос в северо-западной части по сравнению с юго-восточной.

В целом характерный для зон субдукции тип деформирования среды, определенный нами в результате расчета сейсмотектонических деформаций по данным о 2244 механизмах очагов землетрясений за период с 1977 г. по 7 сентября 2017 г., предшествующий сильнейшему землетрясению Чьяпас, имеет в Центрально-Американской зоне субдукции ряд особенностей.

Преобладание на глубинах до 35 км укорочения по горизонтальным компонентам и удлинения по вертикальной сменяется на глубине 36–70 км переходным типом деформирования с мозаичным распределением деформаций разного знака и еще ниже, в диапазоне глубин 70–105 км, характеризуется противоположным по отношению к верхнему горизонту типом деформирования с преимущественным удлинением по горизонтальным компонентам и укорочением по вертикальной.

Неоднородности в таком преимущественном характере деформирования среды в Центрально-Американской зоне субдукции наиболее ярко проявляются в районе залива Теуантепек в области будущей деструкции, вызванной катастрофическим землетрясением Чьяпас 8 сентября 2017 г. ($M_w = 8.2$).

Анализ механизмов очагов землетрясений и рассчитанных по ним сейсмотектонических деформаций за период 1977–2017 гг. позволил выявить приуроченность очага землетрясения Чьяпас к границе перехода от близгоризонтальных деформаций укорочения к деформациям удлинения в диапазоне глубин 36–70 км. Кроме этого, обнаружена локальная область близгоризонтальных деформаций удлинения в верхнем слое (1–35 км) к западу и северо-западу от очага будущего землетрясения. Такой тип деформаций создает условия разупрочнения блочной среды, что может объясняться наличием зоны деформационной тени вблизи формирующегося очага.

По всей видимости, как структурные тектонические, так и реологические особенности среды в районе залива Теуантепек способствовали формированию зоны деформационной тени и ее эволюции вплоть до момента реализации в 2017 г. сильнейшего за последнее столетие в Центрально-Американской зоне субдукции землетрясения Чьяпас с $M_w = 8.2$.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Госзадания (проекты 0331-2019-0006, 0331-2019-0012) и при финансовой

поддержке РФФИ (проект № 17-05-01234). Авторы благодарят рецензентов за полезные замечания.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Alvarado G.E., Benito B., Staller A., Climent Á., Camacho E., Rojas W., Marroquín G., Molina E., Talavera J.E., Martínez-Cuevas S., Lindholm C., 2017. The New Central American Seismic Hazard Zonation: Mutual Consensus Based on up to Day Seismotectonic Framework. *Tectonophysics* 721, 462–476. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.013>.
- Ambraseys' N.N., Adams R.D., 1996. Large-Magnitude Central American Earthquakes, 1898–1994 *Geophysical Journal International* 127, 665–692. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb04046.x>.
- Anderson J.G., Singh S.K., Espindola J.M., Yamamoto J., 1989. Seismic Strain Release in the Mexican Subduction Thrust. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 58 (4), 307–322. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(89\)90102-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(89)90102-7).
- Benz H.M., Dart R.L., Villaseñor A., Hayes G.P., Tarr A.C., Furlong K.P., Rhea S., 2011. Seismicity of the Earth 1900–2010. Mexico and Vicinity. Available from: <https://pubs.usgs.gov/of/2010/1083/f/>.
- Bulletin of the International Seismological Centre catalog search, 2019. Available from: http://www.isc.ac.uk/isc_bulletin/search.
- Bushenkova N.A., Kuchai O.A., Chervov V.V., 2018. Submeridional Boundary Zone in Asia: Seismicity, Lithosphere Structure and the Distribution of Convective Flows in the Upper Mantle. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (3), 1007–1023 (in Russian) [Бушенкова Н.А., Кучай О.А., Червов В.В. Субмеридиональная пограничная зона в Азии: сейсмичность, структура литосферы и распределение конвективных потоков в верхней мантии // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 1007–1023]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0381>.
- Cáceres D., 2003. Earthquake Sources and Hazard in Northern Central America. *Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* 834. Uppsala, 29 p.
- Dyad'kov P.G., Kuchai O.A., Romanenko Yu.M., 2017. Seismotectonic Deformations of the Contact Zone of the Nazca and South American Lithospheric Plates Relation to the February 27, 2010 M_w 8.8 Maule Earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (3), 655–671 (in Russian) [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 // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 3. С. 655–671]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-3-0311>.
- Dyad'kov P.G., Mikheeva A.V., 2010. The Expert Earthquake Database (EEDB) for Seismic-Geodynamic Research. *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics* 13, 15–30.
- Ellis A., Demets C., Briole P., Cosenza B., Flores O., 2018. GPS Constraints on Deformation in Northern Central America from 1999 to 2017, Part 1 – Time-Dependent Modeling of Large Regional Earthquakes and Their Post-Seismic Effects. *Geophysical Journal International* 214 (3), 2177–2194. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy249>.
- Franco A., Lasserre C., Lyon-Caen H., Kostoglodov V., Molina E., Guzman-Speziale M., Monterosso D., Robles V., Figueroa C., Amaya, Barrier E., Chiquin L., Moran S., Flores O., Romero J., Santiago J. A., Manea M., Manea V. C., 2012. Fault Kinematics in Northern Central America and Coupling Along The subduction Interface of the Cocos Plate, from GPS Data in Chiapas (Mexico), Guatemala and El Salvador. *Geophysical Journal International* 189, 1223–1236. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05390.x>.
- Gol'din S.V., Kuchai O.A., 2007. Seismic Strain in the Altai-Sayan Active Seismic Area and Elements of Collisional Geodynamics. *Russian Geology and Geophysics* 48, 536–557. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.005>.
- Khain V.E., Lomize M.G., 1995. *Geotectonics and Fundamentals of Geodynamics*. Moscow State University, Moscow, 480 p. (in Russian) [Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: МГУ, 1995. 480 с.].
- Kim Y., Clayton R.W., Jackson J.M., 2010. Geometry and Seismic Properties of the Subducting Cocos Plate in Central Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 115, B06310. <https://doi.org/10.1029/2009JB006942>.
- Kostrov B.V., 1975. *Mechanics of Earthquake Source*. Nauka, Moscow, 176 p. (in Russian) [Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.].
- Kuchai O.A., Bushenkova N.A., Tataurova A.A., 2015. Structure of the Lithosphere and Seismotectonic Deformations in Contact Zone of Lithospheric Plates in the Sumatra Island region. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (1), 77–89 (in Russian) [Кучай О.А., Бушенкова Н.А., Татаурова А.А. Структура литосферы и сейсмотектонические деформации зоны контакта литосферных плит в районе острова Суматра // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 1. С. 77–89]. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0173>.
- Kuchai O.A., Dyadkov P.G., Romanenko Yu.M., Dzhumagalieva Z.S., 2018. Seismotectonic Deformations in the Mexican Subduction Zone. In: *Subsoil Use. Mining. Directions and Technologies for Search, Exploration and Development of Mineral Deposits. Economics. Geoecology: Proceedings of International Scientific Conference*. Vol. 3. Novosibirsk, p. 207–214 (in Russian) [Кучай О.А., Дядьков П.Г., Романенко Ю.М., Джумагалиева З.С. Сейсмотектонические деформации в Мексиканской субдукционной зоне // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Материалы Международной научной конференции. 2018. Т. 3. С. 207–214].
- Kuchai O.A., Kozina M.E., 2015. Regional Features of Seismotectonic Deformations in East Asia Based on Earthquake Focal Mechanisms and Their Use for Geodynamic Zoning. *Russian Geology and Geophysics* 10, 1491–1499. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.011>.
- Kyriakopoulos C., Newman A.V., Thomas A.M., Moore-Driskell M., Farmer G.T., 2015. A New Seismically Constrained Subduction Interface Model for Central America. *Journal of*

Geophysical Research: Solid Earth 120 (8), 1–13. <https://doi.org/10.1002/2014JB011859>.

Lefeldt M., Grevemeyer I., 2008. Centroid Depth and Mechanism of Trench-Outer Rise Earthquakes. *Geophysical Journal International* 172 (1), 240–251. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03616.x>.

Manea V.C., Manea M., 2011. Flat-Slab Thermal Structure and Evolution beneath Central Mexico. *Pure Applied Geophysics* 168, 1475–1487. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0207-9>.

Mikheeva A.V., Marchuk An.G., Dyadkov P.G., 2014. Geoinformation Systems for Studying Seismicity and Impact Cratering Using Remote Sensing Data. In: Dayana Nelson (Ed.), *Geographic Information Systems (GIS): Techniques, Applications and Technologies*. Nova Science Publishers, p. 151–215.

Pardo M., Sufirez G., 1995. Shape of the Subducted Rivera and Cocos Plates in Southern Mexico: Seismic and Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 100 (B7), 12357–12377. <https://doi.org/10.1029/95JB00919>.

Pérez-Campos X., Kim Young Hee, Husker A., Davis P.M., Clayton R.W., Iglesias A., Pacheco J.F., Singh S.K., Manea V.C., Gurnis M., 2008. Horizontal Subduction and Truncation of the Cocos Plate beneath Central Mexico. *Geophysical Research Letters* 35, L18303. <https://doi.org/10.1029/2008GL035127>.

Ramírez-Gaytán A., Bandy W. L., Jaimes M. A., Salido-Ruiz R. A., Preciado A., Huérfano V. and Cárdenas-Monroy C., 2015. Analysis of the Unusual Earthquake of 13 August 2006 in Michoacán, México. *Journal of Volcanology and Seismology* 9 (6), 412–428. <https://doi.org/10.1134/S0742046315060068>.

Ranero C.R., Villasenör A., Morgan J.P., Weinrebe W., 2005. Relationship between Bend-Faulting at Trenches and Intermediate-Depth Seismicity. *Geochemistry, Geophysics, Geosystem* 6 (12), 1525–2027. <https://doi.org/10.1029/2005GC000997>.

Rebetsky Yu.L., 2007. *Tectonic Stresses and Strength of Natural Mountain Ranges*. Akademkniga, Moscow, 406 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: ИКЦ Академкнига, 2007. 406 с.].

Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Marinin A.V. 2013. Stress and Deformation of the Earth's Crust in the Altai-Sayan Mountainous Area. *Russian Geology and Geophysics* 54 (2), 206–222. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.01.011>.

Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Sycheva N.A., Tatevossian R.E., 2012. Development of Inversion Methods on Fault Slip Data Stress State in Orogenes of the Central Asia. *Tectonophysics* 581, 114–131. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.09.027>.

Rebetsky Yu.L., Marinin A.V., 2006. Preseismic Stress Field before the Sumatra-Andaman Earthquake of 26.12.2004: A Model of Metastable State of Rocks. *Russian Geology and Geophysics* 47 (11), 1173–1185.

Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu., 2014. The State of Stresses of the Lithosphere of Japan before the Catastrophic Tohoku Earthquake of 11 March 2011. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (2), 469–506 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю. Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 469–506]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0137>.

Riznichenko Yu.V., 1985. *Problems of Seismology*. Nauka, Moscow, 408 p. (in Russian) [Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.].

Santoyo M.A., Mikumo T., Quintanar L., 2006. Faulting Process and Coseismic Stress Change during the 30 January, 1973, Colima, Mexico Interplate Earthquake ($M_w=7.6$). *Geofísica Internacional* 45 (3), 163–178.

Stubailo I., Beghein C., Davis P.M., 2012. Structure and Anisotropy of the Mexico Subduction Zone Based on Rayleigh-Wave Analysis and Implications for the Geometry of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Geophysical Research* 117, B05303. <https://doi.org/10.1029/2011JB008631>.

USGS Earthquake Hazards Program, NEIC catalog search, 2017. Available from: <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/earthquakes>.

Wang S.-C., McNally K.C., Geller R.J., 1982. Seismic Strain Release along the Middle America Trench. *Mexico Geophysical Research Letters* 9 (3), 182–185. <https://doi.org/10.1029/GL009i003p00182>.

Ye L., Lay T., Bai Y., Cheung K.F., Kanamori H., 2017. The 2017 M_w 8.2 Chiapas, Mexico, Earthquake: Energetic Slab Detachment. *Geophysical Research Letters* 44, 11824–11832. <https://doi.org/10.1002/2017GL076085>.

Ye L., Lay T., Kanamori H., 2013. Large Earthquake Rupture Process Variations on the Middle America Megathrust. *Earth and Planetary Science Letters* 381, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.08.042>.

Yunga S.L., 1990. *Methods and Results of Seismotectonic Deformation Studies*. Nauka, Moscow, 191 p. (in Russian) [Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.].

PYOTR G. DYADKOV

Candidate of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia
e-mail: dyadkovpg@ipgg.sbras.ru
ORCID: 0000-0001-5345-9331

ПЕТР ГЕОРГИЕВИЧ ДЯДЬКОВ

канд. геол.-мин. наук, заведующий лабораторией
Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Россия

OLGA A. KUCHAY

Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia
e-mail: kuchayoa@ipgg.nsc.ru
ORCID: [0000-0003-1627-1115](https://orcid.org/0000-0003-1627-1115)

ОЛЬГА АНАТОЛЬЕВНА КУЧАЙ

канд. физ.-мат. наук, с.н.с.
Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Россия

YULIA M. ROMANENKO

Researcher
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia
e-mail: romanenkoym@ipgg.sbras.ru
ORCID: [0000-0002-5072-5582](https://orcid.org/0000-0002-5072-5582)

ЮЛИЯ МИХАЙЛОВНА РОМАНЕНКО

н.с.
Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Россия

ZARINA S. DZHUMAGALIYEVA

Undergraduate
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia
e-mail: zarina-dzhumagal@bk.ru
ORCID: [0000-0001-9504-0395](https://orcid.org/0000-0001-9504-0395)

ЗАРИНА САРИККЫЗЫ ДЖУМАГАЛИЕВА

магистрант
Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Россия