

## СИЛЬНОЕ ГЛУБОКОФОКУСНОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 19.08.2018 г. ( $M_W = 8.2$ ) К ЗАПАДУ ОТ ОСТРОВОВ ТОНГА В КОНТЕКСТЕ РАЗВИТИЯ НАШИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ГЛУБОКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

© 2021 г. А. И. Лутиков<sup>1,2, \*</sup>, Е. А. Рогожин<sup>1,2, \*</sup>, Г. Ю. Донцова<sup>1,2, \*\*</sup>, В. Н. Жуковец<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ФИЦ Единая геофизическая служба РАН, г. Обнинск, Россия

\*E-mail: ail@ifz.ru

\*\*E-mail: donzova@ifz.ru

Поступила в редакцию 12.12.2019 г.

После доработки 13.07.2020 г.

Принята к публикации 31.07.2020 г.

Рассмотрено одно из сильнейших глубоких землетрясений 18.08.2018 г.,  $M_W = 8.2$ ,  $h = 600$  км вблизи о-вов Тонга. Его особенностью является наличие мощной афтершоковой последовательности, что, в общем, нехарактерно для глубоких землетрясений и позволяет рассматривать его как уникальное сейсмическое событие. По афтершокам первых суток получена его трехмерная геометрическая модель очага, изучена сейсмическая история и особенности афтершокового процесса. В частности, оценена продолжительность афтершокового процесса и величина высвободившегося в афтершоках скалярного сейсмического момента. Показано, что очаг землетрясения 18.08.2018 г. относится к NDC-типу. Проведено сравнение некоторых характеристик землетрясения 18.08.2018 г. с таковыми сильного глубокого Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г.,  $M_W = 8.3$  у западного побережья Камчатки.

**Ключевые слова:** глубокие землетрясения, афтершоковая последовательность, механизм очага, тензор сейсмического момента, эллипс рассеяния афтершоков.

**DOI:** 10.31857/S0002333721020034

### ВВЕДЕНИЕ

Землетрясение 19.08.2018 г. с  $M_W = 8.2$  и глубиной очага приблизительно в 600 км явилось одним из трех сильнейших глубокофокусных ( $h > 500$  км) землетрясений планеты, вероятно, за всю историю инструментальных сейсмологических наблюдений. Так, в известной монографии по глубоким землетрясениям Клифа Фролиха [Frohlich, 2006], по имеющимся данным [www.globalcmt.org, Abe, 1981] с 1897 г., других сейсмических событий с  $h \geq 300$  км и  $M_W \geq 8.0$  зафиксировано не было. Два других сильнейших глубоких сейсмических события – это землетрясение 9.06.1994 г. в Боливии также с  $M_W = 8.2$  и глубиной очага около 650 км и Охотоморское землетрясение 24.05.2013 с  $M_W = 8.3$  и глубиной очага около 600 км. Через 18 дней после землетрясения 19.08.2018 г., т.е. 06.09.2018 г. уже в районе о-вов Фиджи произошло еще одно сильное глубокофокусное землетрясение с  $M_W = 7.9$  и глубиной очага 610 км. Эпицентр землетрясения 06.09.2018 г. вблизи о-вов Фиджи расположен приблизительно на 250 км западнее эпицентра землетрясения 19.08.2018 г. у о-вов Тонга.

Вероятно, эти два события могут квалифицироваться с точки зрения геодинамики как парные, но событие вблизи о-вов Фиджи не имело выраженной афтершоковой последовательности и здесь рассматриваться не будет.

Согласно предложенной классификации в статье [Миямура, 1972], глубокофокусные землетрясения подразделяются на три интервала глубин: промежуточные ( $60-70 \text{ км} \leq h \leq 300 \text{ км}$ ), переходные ( $300 \text{ км} < h \leq 450 \text{ км}$ ) и глубокие ( $h > 450 \text{ км}$ ). Автор работы [Frohlich, 2006] разделяет глубокофокусные землетрясения только на два интервала глубин – промежуточные ( $60-70 \text{ км} \leq h \leq 300 \text{ км}$ ) и глубокие ( $h > 300 \text{ км}$ ). Согласно любой из этих классификаций, три упомянутых выше землетрясения ( $M_W \geq 8.0$ ) могут быть отнесены к глубоким.

Характерной особенностью землетрясения 19.08.2018 г. у о-вов Тонга является наличие у него мощной афтершоковой последовательности: согласно данным каталога NEIC, за первые сутки после Главного события произошло 165 афтершоков с  $mb \geq 4.0$ , сильнейшим из которых был афтершок с  $M_W = 6.8$ . Он произошел примерно через

4 ч после Главного события приблизительно на 135 км севернее его инструментального эпицентра.

Вообще, наличие полноценных афтершоковых последовательностей у глубоких землетрясений — явление довольно редкое. Полагают, что землетрясения с промежуточными глубинами или глубокие, имеющие более 20 афтершоков, происходят чрезвычайно редко [Wiens, 1996; 1997]. Только очень небольшое число глубоких землетрясений имеют 15 или более афтершоков, регистрируемых телесейсмическими сетями [Frohlich, 2006]. Последнее уточнение представляется важным: там, где телесейсмические сети регистрируют только отдельные афтершоки или не регистрируют их вовсе, региональные сети могут выявить полноценные афтершоковые последовательности. Разумеется, магнитуды таких событий будут сравнительно невелики.

Перечислим несколько афтершоковых последовательностей глубокофокусных землетрясений. После землетрясения 09.03.1994 г. на островах Тонга ( $M_W = 7.6$ ,  $h_{\text{СМТ}} = 568$  км) локальная сеть зарегистрировала 144 афтершока, расположившихся поперек всей толщины зоны Беньофа, причем афтершоки распространились и на сопредельную асейсмичную область [Wiens., 1994; 1996; 2000; McGuire., 1997]. Упомянувшееся выше Боливийское землетрясение 09.06.1994 г. имело по данным локальной сети 89 афтершоков [Myers, 1995], причем и в этом случае область, занятая афтершоками, превосходит предполагаемую зону Вадати—Беньофа. При этом по данным телесейсмических сетей Глубокое Боливийское землетрясение 9.06.1994 г. вовсе не имело афтершоков.

Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. ( $M_W = 8.3$ ,  $h_{\text{СМТ}} = 611$  км), по данным телесейсмических сетей, землетрясение имело всего 2 сильных афтершока: 24.05.2013 г., с  $M_W = 6.7$ ,  $h_{\text{СМТ}} = 642$  км и 01.10.2013 г. так же с  $M_W = 6.7$ ,  $h_{\text{СМТ}} = 585.5$  км. В то же время региональная сеть КФ ЕГС РАН зарегистрировала 112 афтершоков с  $M_W \geq 2.7$ . Ниже афтершоковый процесс Охотоморского землетрясения 2013 г. будет рассмотрен более подробно.

Число глубоких ( $h > 300$  км) землетрясений в зоне Тонга—Кермадек превосходит общее число таких землетрясений во всех остальных сейсмоактивных регионах мира [Frohlich, 2006]. Сейсмичность этой зоны связана с субдукцией Тихоокеанской плиты под плиту Тонга на севере и под плиту Кермадек на юге. В более обобщенном плане архипелаг Тонга расположен на границе Тихоокеанской и Австралийской литосферных плит, к западу от глубоководного желоба Тонга.

Наличие у глубокого землетрясения 19.08.2018 г. вблизи о-вов Тонга ( $h \approx 600$  км) полноценной афтершоковой последовательности делает его достаточно уникальным сейсмическим событием и позволяет оценить некоторые характеристики его очага, а так-

же сравнить динамику релаксационных процессов для глубоких и коровых землетрясений.

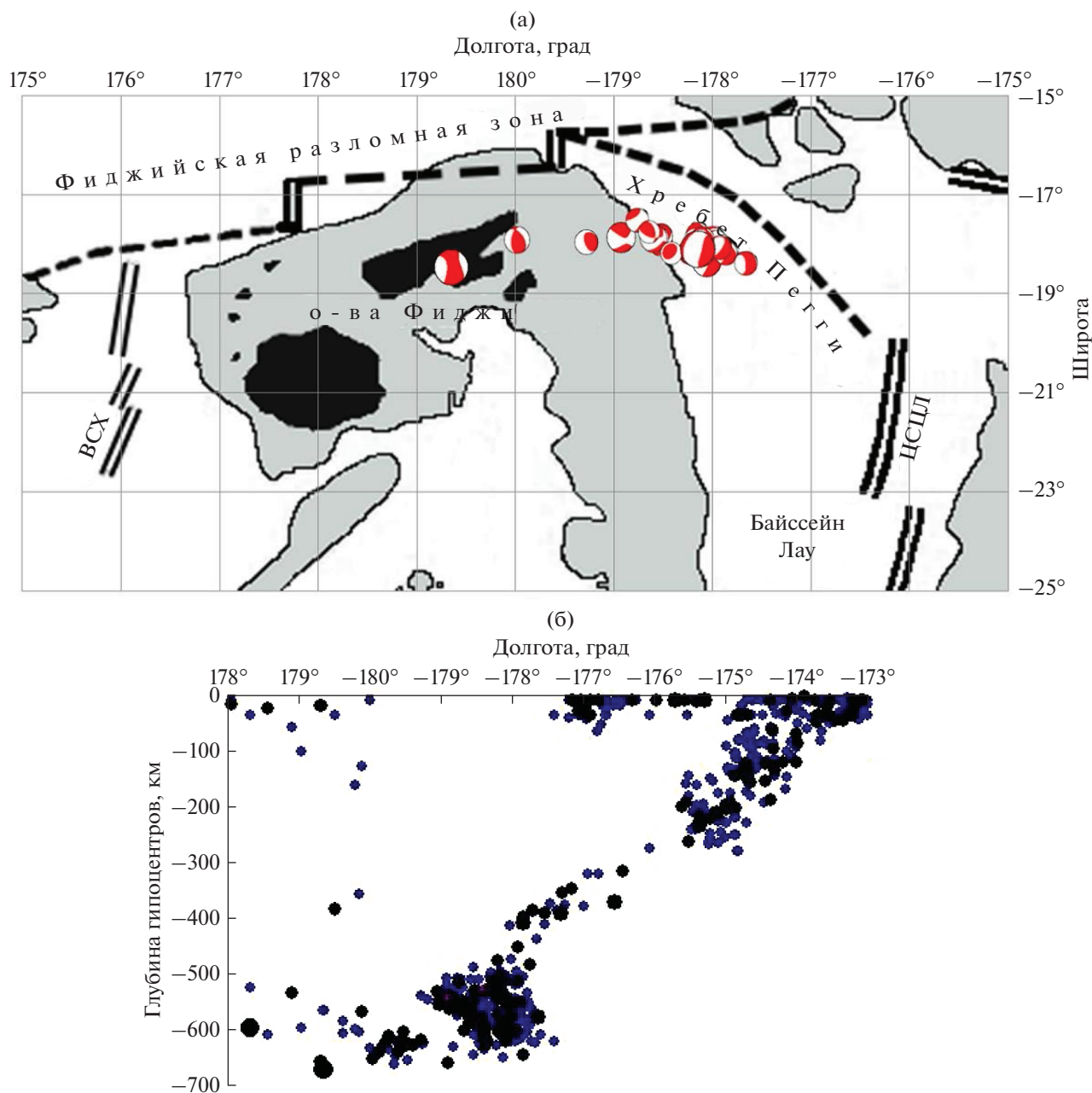
## ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

Острова архипелага Тонга образуют островную дугу Тонга—Тофуа северо—северо-восточного простирания, располагающуюся к западу от глубоководного желоба Тонга на стыке двух крупнейших литосферных плит: Индо-Австралийской на западе и Тихоокеанской на востоке [Лукк, 2008; Hannington, 2019]. На рис. 1а, за основу которого взят фрагмент тектонической схемы Тонга-Новогвбридского региона из работы [Колобов, 2003], представлена сеймотектоническая схема размещения эпицентров главного толчка и наиболее сильных афтершоков.

Островная дуга относится к “Тихоокеанскому огненному кольцу”, которое опоясывает весь этот крупнейший на Земле океан. Океаническая кора Тихоокеанской плиты на границе с Индо-Австралийской в районе островов Тонга погружается в западном направлении в мантию вдоль выделяемой здесь зоны субдукции. Наиболее очевидным выражением такой зоны здесь является наличие глубоководного желоба и задугового бассейна Лау (рис. 1а), а также интенсивной вулканической активности на островах, вызванной погружением океанической коры под континентальную и ее частичным плавлением в литосфере. К западу от островной дуги Тонга наблюдается V-образная в разрезе зона бассейна Лау северо—северо-восточного простирания, который протягивается в южном направлении к островам Новой Зеландии.

Вдоль этой межплитной границы Тихоокеанская плита опускается под Индо-Австралийскую в результате непрекращающегося давления в литосфере от сближения этих двух огромных областей. Скорость, с которой происходит этот процесс, относительно высока, в среднем около 7 см в год. Нет полной ясности, является ли этот процесс непрерывным, или он протекает в виде серий внезапных скачков, возможно связанных с крупными землетрясениями. Землетрясения происходят по всей толщине Тихоокеанской плиты. Причем очаги наиболее крупных сейсмических событий иногда занимают всю толщу слэба (рис. 1б). В целом, гипоцентры субдукционных землетрясений распространяются до глубин свыше 600 км.

Еще одной структурной особенностью глубоководного желоба Тонга и Тофуа, обрамляющего вулканическую дугу с востока, является то, что эти структуры резко ограничиваются на севере гигантской зоной разломов системы Фиджи. Здесь, в области главного разрыва в коре, известного как зона разломов Витязь, трог Тонга делает резкий поворот на запад. Зона сочленения разломов



**Рис. 1.** (а) – Сейсмотектоническая схема размещения эпицентров главного толчка (наиболее крупная стереограмма в восточной части облака афтершоков) и сильных глубоких афтершоков ( $h > 400$  км) землетрясения 19.08.2018 г. с  $M_W = 8.2$ , а также эпицентра толчка 06.09.2018 г. с  $M_W = 7.9$  и глубиной гипоцентра 610 км у о-вов Фиджи (наиболее западный эпицентр). Сокращения: ВСХ – Восточный спрединговый хребет, ЦСЦЛ – Центральный спрединговый центр; (б) – структура глубинной сейсмичности по данным каталога NEIC (2004–2019 гг.,  $m_b \geq 4.8$ ) вблизи очага землетрясения 19.08.2018 г.,  $M_W = 8.2$  (в полосе  $17^\circ$ – $19^\circ$  ю.ш.). Ясно наблюдается выполаживание слэба Тихоокеанской плиты на глубинах 500–700 км при достижении нижней границы верхней мантии.

выступает в качестве гигантского дизъюнктивный узла, на северной границе Тихоокеанской плиты в области ее пододвигания под островную дугу Тонга (рис. 1б).

Размещение эпицентров главного толчка и сильных афтершоков землетрясения 19.08.2018 г. с  $M_W = 8.2$  указывает на то, что вытянутый в

западном–юго-западном направлении в сторону очага землетрясения 06.09.2018 г. ( $M_W = 7.9$ ), под островную дугу Фиджи, шлейф афтершоков этого сейсмического события (не относящийся непосредственно к его очагу) располагался на глубинах 450–650 км. Он вытянулся от гипоцентра землетрясения 19.08.2018 г. ( $M_W = 8.2$ ,  $h \approx 600$  км) у

о-вов Тонга, приблизительно  $178^\circ$  з.д., вплоть до гипоцентра землетрясения 06.09.2018 г. ( $M_W = 7.9$ ,  $h = 610$  км) у о-вов Фиджи ( $\sim 178.3^\circ$  в.д.). Отметим, что согласно данным сейсмической томографии слэб Тихоокеанской плиты в районе желоба Тонга ориентирован в западном направлении и погружается в верхнюю мантию под углом  $45^\circ$ . На томографических моделях в переходной зоне между верхней и нижней мантией на глубинах 400–700 км он принимает субгоризонтальное положение [Колобов, 2003]. Таким образом, достаточно протяженный (около 400 км) участок, где гипоцентры располагаются приблизительно в одном интервале глубин, может ассоциироваться с субгоризонтальным положением слэба Тихоокеанской плиты.

На рис. 1б представлен вертикальный разрез структуры сейсмичности между  $17^\circ$  и  $19^\circ$  ю.ш., в окрестности очага глубокого землетрясения 19.08.2018 г.,  $M_W = 8.2$ . При этом гипоцентры землетрясений маркируют положение погружающегося слэба. Видно, что в месте, где плита достигает подошвы верхней мантии, она деформируется и начинает двигаться вдоль нее на запад, как это и видно в плане на рис. 1а.

Смещение в очаге главного толчка представляло собой сброс по пологой плоскости, погружающейся в западном–северо-западном направлении. Такое решение хорошо увязывается с ориентировкой облака эпицентров афтершоков, длинная ось которого вытянута в этом же направлении. Такая интерпретация подвижки в очаге коррелирует с геодинамическими представлениями о приуроченности гипоцентров глубоких сильных толчков к верхней поверхности погружающейся Тихоокеанской плиты.

### СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ГЛУБОКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 19.08.2018 г. ВБЛИЗИ О-ВОВ ТОНГА

Информационной базой для выполнения работы служили каталоги NEIC [<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>] и CMT [<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>; Dziewonski et al., 1981; Ekström et al., 2012]. В данной работе каталог NEIC использовался как для анализа сейсмической истории, так и для изучения афтершокового процесса землетрясения 19.08.2018 г. Согласно нашей оценке, низшей представительной магнитудой каталога NEIC в области о-вов Тонга признана  $mb = 4.0$ . Каталог CMT содержит наиболее полные данные о тензорах сейсмического момента землетрясений с  $M_W \sim 5.5$  и выше, которые являются представительным для всей планеты приблизительно с начала 90-х гг. прошлого века [Kagan, 2003]. Поэтому при анали-

зе данные каталогов NEIC и CMT использовались совместно.

Для изучения динамики высвобождения скалярного сейсмического момента ( $M_0$ ) рабочий каталог был унифицирован по  $M_W$ . При этом использовалась корреляционная зависимость между магнитудами  $mb$  NEIC и  $M_W$  CMT, полученная по 204 парам значений глубоких ( $h \geq 300$  км) землетрясений в интервале магнитуд  $4.8 \leq mb \leq 5.8$ , в виде:

$$M_W = 1.036mb + 0.183, \quad R_c = 0.962, \quad (1)$$

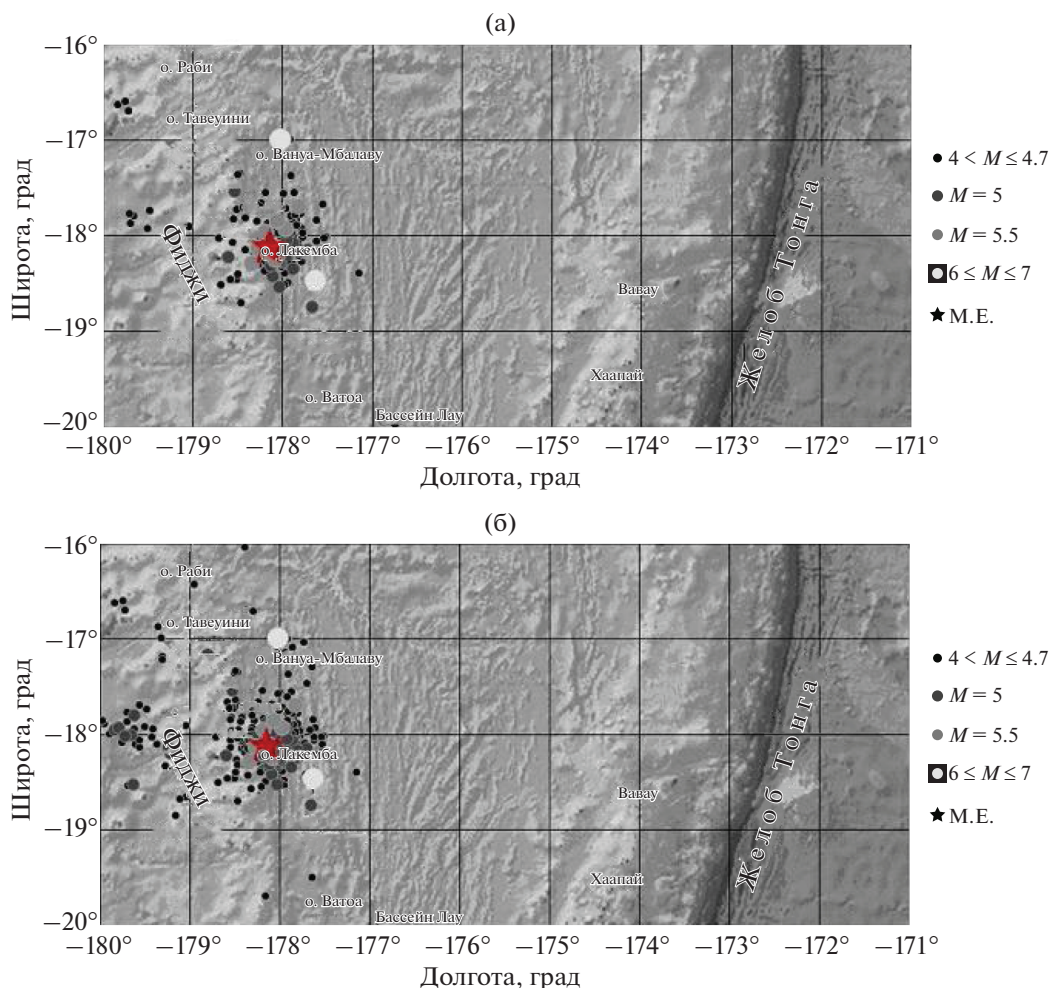
где  $R_c$  – коэффициент линейной корреляции. При получении зависимости (1) брались средние значения  $M_W$  для каждой магнитуды  $mb$  с шагом 0.1 единицы магнитуды. При этом для  $4.8 \leq mb \leq 5.1$  (где число значений ( $N(M_W)$ )  $M_W$  для каждого значения  $mb$  было больше 35) распределение  $N(M_W)$  было близко к распределению Гаусса. Переход от  $M_W$  к скалярному сейсмическому моменту  $M_0$  осуществлялся по формуле Канамори [Kanamori, 1978]. Отметим, что при применении формулы (1) ошибки могут неконтролируемо возрастать вне интервала магнитуд, в котором она получена.

### ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 19.08.2018 г., $M_W = 8.2$ , $H \approx 600$ КМ

На рис. 2 представлены схемы афтершоков землетрясения за первые сутки (а) и за первый месяц (б) после землетрясения по данным каталога NEIC, здесь и далее ME – главное событие.

Видно, что конфигурации ансамблей афтершоков на рис. 2а и 2б достаточно близки, хотя на рис. 2б отчетливо видно распространение облака афтершоков землетрясения 19 августа на сопредельные структуры, вероятно непосредственно несвязанные с областью очага этого землетрясения. Поэтому при анализе афтершоков, непосредственно относящихся к очагу, мы ограничимся прямоугольной областью с координатами:  $-18.73^\circ \leq \varphi \leq -17.33^\circ$ ,  $-178.73^\circ \leq \lambda \leq -177.53^\circ$ .

Судя по облаку афтершоков 1 сут (рис. 2а), очаг имеет близкую к изометрической форму и немного вытянут в широтном направлении: его размеры с севера на юг оцениваются приблизительно в 155 км, а с запада на восток – в 126 км. Более объективные, хотя и несколько заниженные, данные о размерах очага дают расчеты 1 – сигмового эллипса рассеяния афтершоков ( $mb \geq 4.0$ ) [Лутиков, 2002], согласно которым большая полуось эллипса по афтершокам 1-го дня составила 26.0 км, а малая – 22.6 км. Почти такими же оказались и оценки размеров полуосей эллипса рассеяния и по афтершокам 1-го мес.: соответственно 27.4 и 23.1 км. Координаты геометрического центра ( $\varphi_0$ ,  $\lambda_0$ ) облака афтершоков 1-х сут и 1-го мес. практически совпада-



**Рис. 2.** (а) – Схема афтершоков 1-го дня ( $M_W \geq 4.0$ ) после землетрясения 19.08.2018 г., всего 165 афтершоков; (б) – схема афтершоков 1-го месяца ( $M_W \geq 4.0$ ) после землетрясения 19.08.2018 г., всего 378 афтершоков. На картах главное событие обозначено звездой.

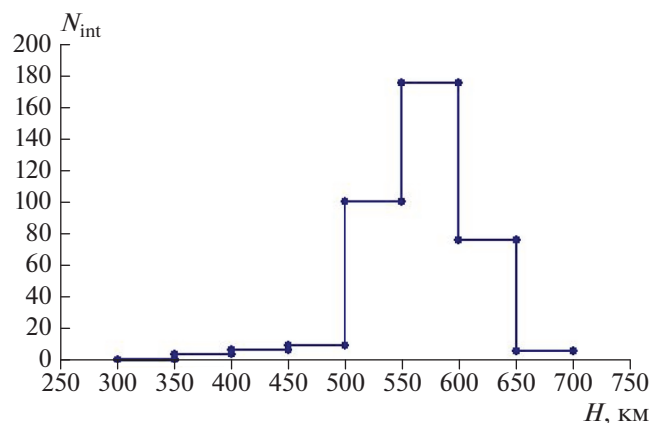
юг: соответственно  $\varphi_0 = -18.06^\circ$ ,  $\lambda_0 = -178.06^\circ$  (сут) и  $\varphi_0 = -18.04^\circ$ ,  $\lambda_0 = -178.08^\circ$  (мес.). При этом координаты инструментального эпицентра ( $\varphi_{\text{ме}} = -18.113^\circ$ ,  $\lambda_{\text{ме}} = -178.152^\circ$ ) отклоняются от координат геометрического центра облака афтершоков всего лишь на сотые доли градуса, что, вероятно, лежит в пределах ошибок их определения.

В работе [Гусев, 1990] была предложена средняя зависимость линейных размеров очага ( $L$ ) от моментной магнитуды  $M_W$  для коровых землетрясений. В соответствии с ней для землетрясения с  $M_W = 8.2$   $L \approx 178$  км, что немного больше полученной здесь визуальной оценки протяженности очага (155 км). При использовании оценок размеров очага для коровых землетрясений визуальным методом [Лутиков, 2002] при пересчете от магнитуды  $M_S$  к  $M_W$  для  $M_W = 8.2$  получим линейную протяженность очага  $L \approx 316$  км, а ширину очага  $W \approx 175$  км, то есть значительно больше его

действительных размеров, судя по афтершокам 1-го дня.

Еще более сильное различие наблюдается при сопоставлении расчетов полуосей эллипсов рассеяния [Лутиков, 2002] облака афтершоков для коровых землетрясений и глубокого землетрясения 19.08.2018 г. у о-вов Тонга. Как уже отмечалось выше, его большая ось оценивается в 52–55 км, а малая – в 45–46 км. Тогда как для корового землетрясения с  $M_W = 8.2$ , согласно оценке, большая ось эллипса рассеяния  $L \approx 143$  км, а его малая ось  $W \approx 88$  км, что приблизительно в 2–3 раза больше, чем для рассматриваемого глубокого землетрясения 19.08.2018 г. у о-вов Тонга.

Таким образом, можно сделать некоторые предварительные выводы относительно размеров очага глубокого ( $h \approx 600$  км) сильного ( $M_W = 8.2$ ) землетрясения 19.08.2018 г. у о-вов Тонга. Очаг землетрясения имеет в плане форму, близкую к изометрической, с размерами большой и малой



**Рис. 3.** Распределение гипоцентров афтершоков 1-го месяца землетрясения 19.08.2018 г. ( $M_W = 8.2$ ) у о-вов Тонга по глубине, построено по 378 афтершокам,  $m_b \geq 4.0$ .

осей, соответственно лежащих в пределах  $55 \leq L \leq 155$  км,  $46 \leq W \leq 126$  км, то есть очаг этого глубокого землетрясения оказывается приблизительно в 2 раза меньше очага корового землетрясения такой же магнитуды.

Рассмотрим теперь распределение гипоцентров афтершоков землетрясения 19.08.2018 г. ( $M_W = 8.2$ ) у о-вов Тонга с глубиной. Такое распределение для афтершоков 1-го месяца ( $m_b \geq 4.0$ ) представлено на рис. 3. Как видно, в интервале глубин 500–650 км сосредоточено около 93% афтершоков. То есть интервал глубин 500–650 км может ассоциироваться с верхней оценкой области локализации очага.

Поскольку большая и малая полуоси эллипса рассеяния афтершоков 1-го дня ориентированы практически с севера на юг и с запада на восток, вдоль этих направлений были построены разрезы облака афтершоков (рис. 4а и 4б).

Судя по области наибольшего сгущения афтершоков, очаг локализован в интервале глубин  $500 \leq h \leq 630$  км. Таким образом, размеры очага по вертикали оказываются близкими к его размерам в плане, то есть очаг, в целом, имеет форму, близкую к изометрической. Это в корне отличает форму очага глубокого землетрясения 19.08.2018 г. вблизи о-вов Тонга от формы очагов близких по магнитуде литосферных землетрясений.

### МЕХАНИЗМ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 19.08.2018 г., $M_W = 8.2$

На рис. 5 (слева) представлен механизм очага этого землетрясения по данным СМТ [<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>].

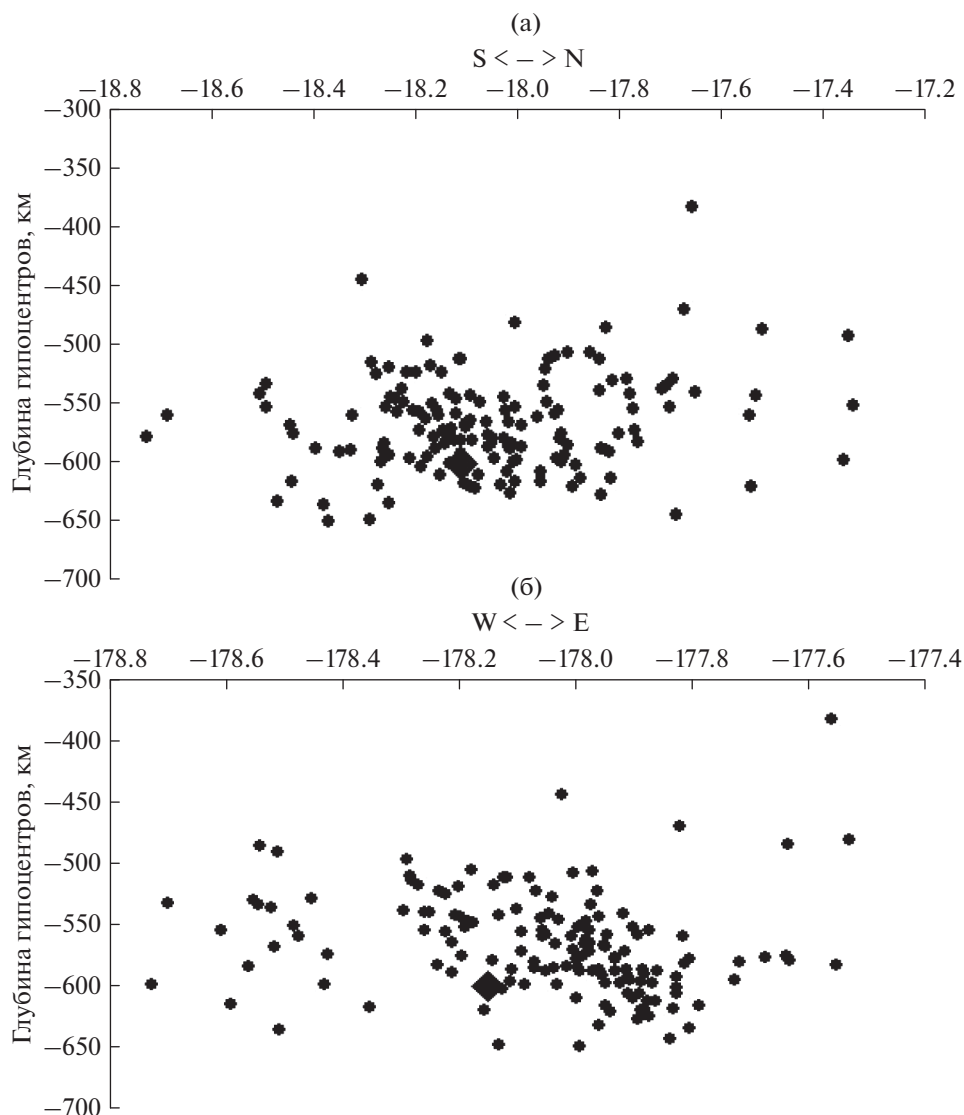
Из рисунка видно, что механизм очага может классифицироваться как сброс и относиться к

выраженному NDC-типу [Frohlich, 1995], характеризуя режим одноосного растяжения. Исследование детерминанта тензора сейсмического момента [Лутиков, 2010] подтверждает этот вывод: детерминант его тензора сейсмического момента, нормированного на скалярный момент ([www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org)), с учетом матрицы ошибок  $\det(M_{ij}/M_0) = 0.140 \pm 0.0045$  является гарантированно положительным и действительно характеризует режим одноосного растяжения.

### СЕЙСМИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ

Была прослежена вся доступная сейсмическая история по ходу высвобождения скалярного сейсмического момента ( $M_0$ ) в окрестности очага глубокого землетрясения 19.08.2018 г.,  $M_W = 8.2$  вблизи о-вов Тонга. При этом оценка размеров области вокруг очага, где рассматривается высвобождение  $M_0$ , не вполне очевидна. Очевидно, что эта область должна совпадать с областью подготовки землетрясения, но сколько-нибудь определенные оценки размеров области подготовки сильного землетрясения отсутствуют. Однако интуитивно кажется, что размеры области подготовки должны, по крайней мере, в несколько раз превосходить его размеры очага. В частности, например, в работе [Родкин, 2007] указывается, что различного типа аномалии наблюдаются в достаточно широкой окрестности сильного ( $M \approx 7$  и более) события на расстояниях от эпицентра главного события, достигающих 4–5 характерных размеров очага [Родкин, 2007]. Исходя из этих соображений, выбранная область анализа была ограничена координатами:  $21.0^\circ$ – $15.0^\circ$  ю.ш.,  $177.0^\circ$ – $180.0^\circ$  в.д. и  $180.0^\circ$ – $176.0^\circ$  з.д. При этом рассматривался интервал глубин  $450 \leq h \leq 650$  км.

Первые сейсмические проявления на этой территории, содержащиеся в каталоге NEIC, относятся к 1919 г., когда 01.01.1919 г. было зарегистрировано сильное глубокое землетрясение с  $M_W = 7.8$  и  $h \approx 485$  км. После этого вплоть до 1963 г. в каталог попадали только отдельные, наиболее сильные события с  $M_W \geq 7.0$ . Достаточно подробным каталог NEIC для этого района становится только с 1973 г. На рис. 6 представлен временной ход высвобождения кумулятивного (накопленного) скалярного сейсмического момента  $M_{0cum}$  в области, ограниченной обозначенными выше координатами. Использование при этом логарифмической зависимости вместо ожидаемой линейной (удовлетворяющей гипотезе стационарности сейсмического режима), вероятно, нуждается в некотором пояснении. Использование логарифмической зависимости, помимо эффекта сглаживания, позволяет показывать в пределах одного графика различающиеся в десятки раз ординаты. В то же время замена линейной зависимости ло-



**Рис. 4.** Глубинный разрез облака афтершоков 1-го дня в направлении юг–север (а); запад–восток (б). Построен по 151 афтершоку ( $m_b \geq 4.0$ ). Главное событие обозначено большим ромбом.

гарифмической на коротком отрезке времени, по сравнению с длящейся многие столетия фазой стационарности сейсмического режима, не приводит к большим искажениям, поскольку при этом, как нетрудно показать, может быть удержан только линейный член разложения экспоненты в ряд.

Из рис. 6 отчетливо видно, что доступный для анализа период времени оказался слишком коротким, чтобы оценить дефицит в высвобождении  $M_0$ . Действительно, в аналитическом виде регрессия на рис. 6 имеет вид:

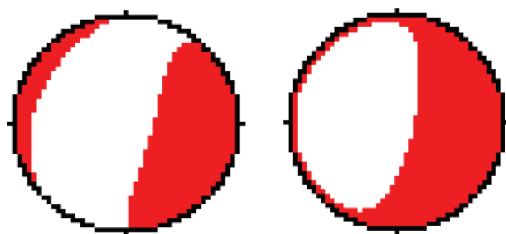
$$\lg M_{0\text{cum}} = 0.010t + 1.199, \quad R_c = 0.937. \quad (2)$$

Из зависимости (2) также следует, что за весь рассматриваемый период дефицит в высвобождении

$M_0$  практически не накапливался, так что на момент возникновения землетрясения 19 августа 2018 года его величина составила  $\Delta M_{0\text{cum}} \approx 5.77 \times 10^{19} \text{ Н} \cdot \text{м}$ , то есть он оказался внутри ошибок регрессии (2). Очевидно, что период подготовки глубокого землетрясения с магнитудой  $M_W > 8.0$  в отдельном регионе, вероятно, заметно превосходит 100 лет.

Погодовое высвобождение  $M_0$  в этой области, которое удалось проследить с 1972 г. (рис. 7), также не демонстрирует убедительных свидетельств подготовки сильного глубокого землетрясения 19.08.2018 г.

Единственной особенностью рис. 7 является не слишком надежный намек на сейсмическое за-



**Рис. 5.** Механизмы очагов землетрясений 19.08.2018 г.,  $M_W=8.2$ ,  $h=600$  км (слева) и Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г.,  $M_W=8.3$ ,  $h=611$  км (справа) по данным каталога CMT.

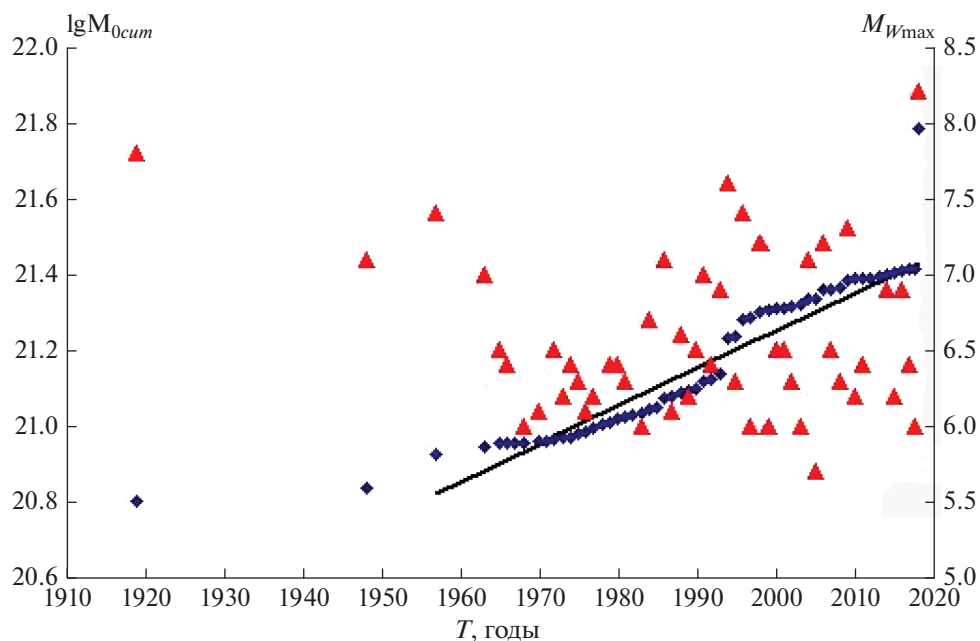
тишь перед землетрясением 19.08.2018 г. в 2010–2013 гг., сменившееся с 2014 г. небольшой, не превосходящей фон, сейсмической активизацией.

### ОСОБЕННОСТИ АФТЕРШОКОВОГО ПРОЦЕССА

Афтершоковый процесс глубокого землетрясения 18.08.2018 г. вблизи о-вов Тонга представляется абсолютно нетипичным, учитывая его глубину гипоцентра ( $h=600$  км). Как по числу заметных ( $mb \geq 4.0$ ) афтершоков, так и по его продолжительности он, скорее, подобен афтершоковому процессу типичного корового землетрясения. Землетрясение имело 5 афтершоков с  $M_W \geq 6.0$ , наиболее сильные из которых:  $M_W=6.8$  (произошел приблизительно через

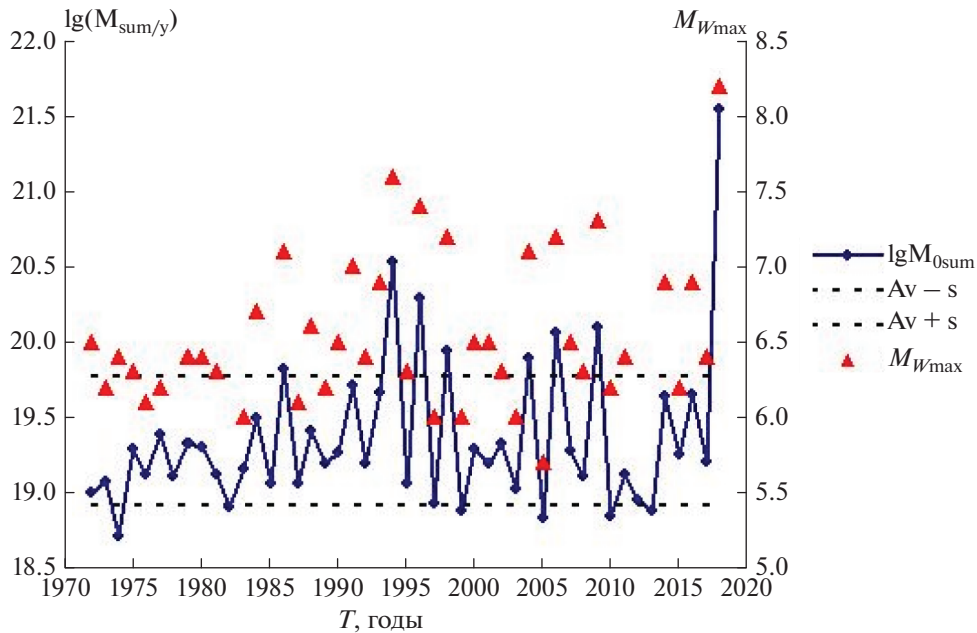
4 ч после Главного события (ME) [<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>],  $M_W=6.7$  30.09.2018 г. и  $M_W=6.8$  18.11.2018 г. [<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>].

В соответствии с рис. 2б и рис. 4 изучение афтершокового процесса было ограничено территорией:  $-20.5^\circ \leq \varphi \leq -16.0^\circ$ ,  $-180.0^\circ \leq \lambda \leq -176.5^\circ$  и интервалом глубин  $400 \leq h \leq 650$  км. На рис. 8 представлен посуточный временной ряд высвобождения  $M_0$  в афтершоках по 19.09.2019 г. Как видно из рис. 8, с середины марта 2019 г. происходит постепенный выход кривой  $M_{0aft}/\text{день}$  на фон, где он находился более 4-х мес. При этом уровень фона (среднее значение и коридор стандартных отклонений) определялся по многолетнему уровню фона на рис. 6, пересчитанного с годового на посуточное высвобождение  $M_0$  и с учетом приблизительно в 3 раза меньшей площади анализа в случае афтершоков. Сильное землетрясение 01.09.2019 г. ( $M_W=6.7$ ,  $h \approx 600$  км) которое произошло в афтершоковой области рассматриваемого землетрясения 19.08.2018 г., по видимому, все же не является его афтершоком. Ниже будут приведены некоторые соображения по этому поводу. Поэтому окончание афтершокового процесса, конечно, с известной долей условности можно обозначить концом апреля 2019 г., то есть его продолжительность можно оценить в 247 дней или примерно в 8 мес. За это время высвободившийся в афтершоках  $M_0$  со-



**Рис. 6.** Временной ход высвобождения  $M_{0cum}$  в области подготовки глубокого землетрясения 19.08.2018 г. с 1919 по 2018 гг. включительно. Прямой линией показана линейная регрессия, аппроксимирующая наблюдаемые данные за период с 1957 по 2003 гг. включительно. Треугольниками показаны магнитуды (правая ось ординат) наиболее сильных ( $M_W \geq 5.7$ ) глубоких сейсмических событий ( $h \geq 450$  км).





**Рис. 7.** Погодовое высвобождение  $M_0$  в области  $21.0^\circ\text{--}15.0^\circ$  ю.ш.,  $177.0^\circ\text{--}180.0^\circ$  в.д. и  $180.0^\circ\text{--}176.0^\circ$  з.д.;  $450 \leq h \leq 650$  км с 1972 по 2018 гг. включительно. Треугольниками показаны магнитуды (правая ось ординат) наиболее сильных ( $M_W \geq 5.7$ ) глубоких сейсмических событий ( $h \geq 450$  км). Пунктиром дан коридор стандартных отклонений.

ставил  $\approx 9.85 \times 10^{19}$  Н·м или приблизительно 3.9% от  $M_0$  Главного события 19.08.2018 г. Такая оценка вполне соответствует, например, полученной ранее средней оценке для коровых Курило-Камчатских землетрясений [Лутиков, 2013], что также вряд ли типично для глубоких землетрясений.

На рис. 9а показан посуточный временной ряд высвобождения  $M_0$  в афтершоках в течение 1-го мес. после МЕ. Видно, что в течение первых 1–3 нед. после МЕ афтершоковый процесс может удовлетворять аналогу закона Омори [Omori, 1894; Utsu, 1961], сформулированного в терминах высвобож-

дения в афтершоках скалярного сейсмического момента  $M_0$ . Действительно, первые 22 дня афтершокового процесса перестроены на рис. 9б в билогарифмическом масштабе. На рисунок также добавлены линии регрессии за первые 7 (сплошная прямая), 17 (пунктир с точками) и 22 дня (простой пунктир) афтершокового процесса.

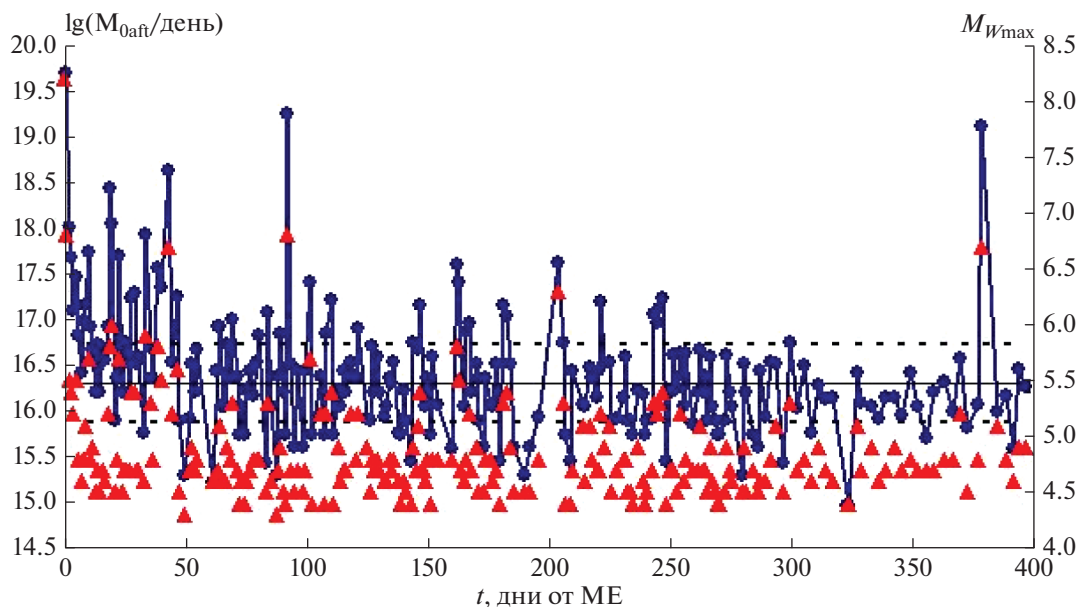
В уравнения регрессии в знаменатели добавлена 1 для того, чтобы избежать сингулярности в нуле. В результате они имеют вид:

$$\begin{aligned} 7 \text{ дней } M_0 [\text{Н} \cdot \text{м}/\text{день}] &= 20.70 / (1 + t)^{4.72}, & R_c &= 0.948, \\ 17 \text{ дней } M_0 [\text{Н} \cdot \text{м}/\text{день}] &= 19.44 / (1 + t)^{2.49}, & R_c &= 0.8255, \\ 22 \text{ дня } M_0 [\text{Н} \cdot \text{м}/\text{день}] &= 18.92 / (1 + t)^{1.78}, & R_c &= 0.613. \end{aligned} \quad (3)$$

Из формул (3) следует, что величина коэффициента корреляции обратно пропорциональна числу дней, по которым строилась регрессия; при этом уменьшается и показатель степени в знаменателе. Из формул (3) также следует, что аналог закона Омори в терминах высвобождения  $M_0$  для афтершоковой последовательности глубокого землетрясения 19.08.2018 г. удовлетворительно

соблюдается в течение первых 17 дней после его начала.

Вернемся к оценке продолжительности афтершоковой последовательности. На рис. 10 представлен временной ход высвобождения кумулятивного (накопленного) скалярного сейсмического момента в афтершоках ( $M_{0\text{aft}}$ ) в долях от  $M_0$  Главного события ( $M_{0\text{me}}$ ) в области повторных



**Рис. 8.** Посуточный временной ряд высвобождения  $M_0$  в афтершоках по конец марта 2019 г. Тонкой горизонтальной линией показан средний уровень фона; пунктирными линиями дан коридор стандартных отклонений. Треугольниками обозначены максимальные магнитуды (правая ось ординат) глубоких сейсмических событий ( $h \geq 400$  км) на каждом шаге дискретизации.

толчков землетрясения 19.08.2018 г. По начальному этапу (2–78 дни) афтершокового процесса была построена линейная регрессия в виде:

$$M_{0aft}/M_{0me} = (0.000154 \pm 0.000006)t + 0.0187 \pm 0.0005, \quad R_c = 0.951. \quad (4)$$

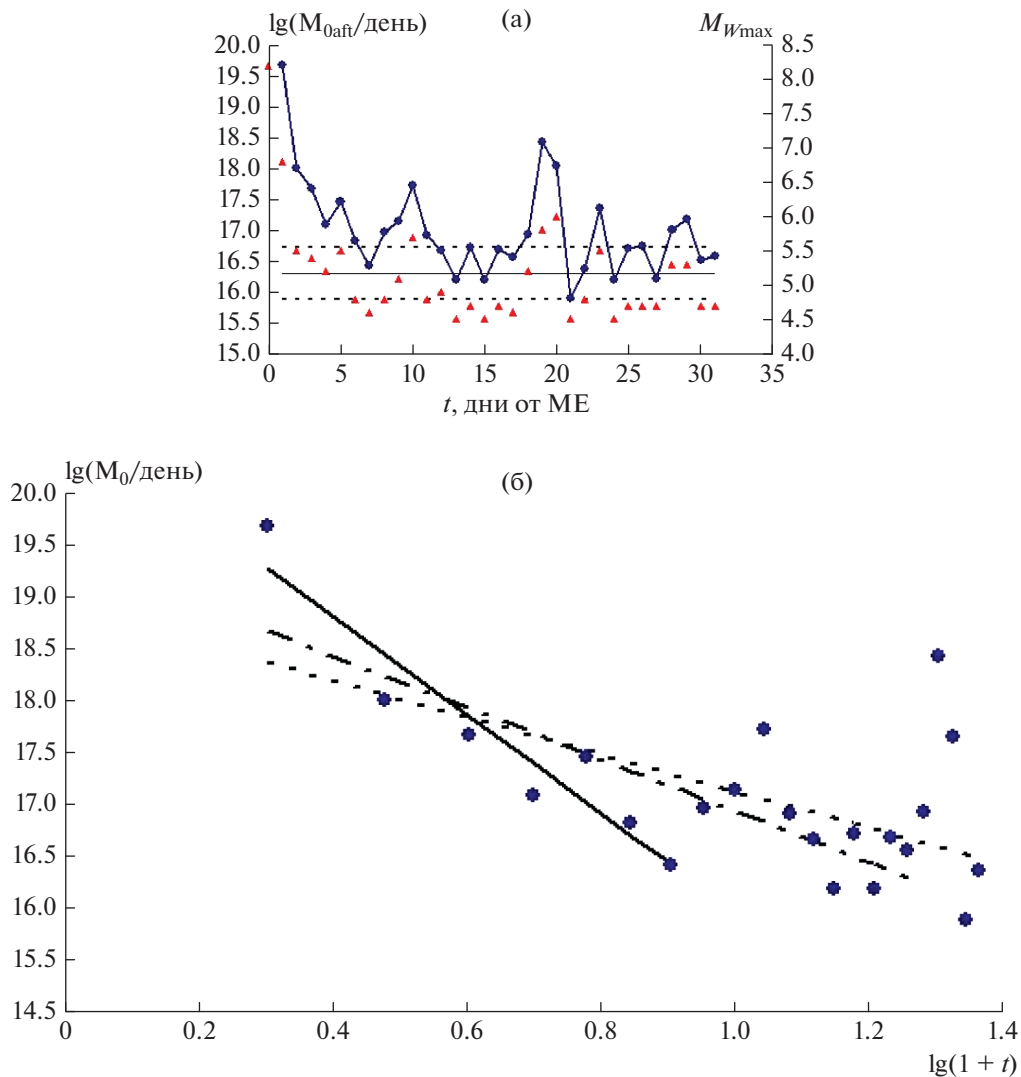
Из рис. 10 видно, что к моменту возникновения сильного афтершока 18.11.2018 г. ( $M_W = 6.8$ ,  $h = 540$  км) возник определяемый по разности прогнозного (линия регрессии) и наблюдаемого значений  $M_{0aft}$  дефицит в высвобождении  $M_{0aft}$   $\Delta M_0 = 9.54 \times 10^{18}$  Н · м, что соответствует землетрясению с магнитудой  $M_W = 6.6$  при фактической моментной магнитуде афтершока 6.8. То есть прогнозная и фактическая магнитуды практически совпадают. После афтершока 18.11.2018 г. произошло быстрое расхождение регрессионной и наблюдаемой зависимостей  $M_{0aft}(t)$ , что может быть индикатором постепенного завершения афтершокового процесса. Интервал времени с 30.09.2018 г. (43-й день от МЕ) по 17.11.2018 г. (91-й день от МЕ), соответствующий столбчатому участку графика  $M_{0aft}/M_{0me}$ , может рассматриваться в качестве внутреннего сейсмического затишья перед афтершоком 18.11.2018 г. с  $M_W = 6.8$  внутри афтершоковой последовательности. Как видно из рис. 10, этим афтершоком завершается квазистационарная фаза высвобождения  $M_0$  внутри афтершокового процесса, индикатором чего служит начавшееся резкое расхождение прогнозной и наблюдаемой зависимости на рис. 10. Поэтому

достаточно сильное глубокое сейсмическое событие 01.09.2019 г. ( $M_W = 6.7$ ), по нашему мнению, уже вряд ли является афтершоком землетрясения 19.08.2018 г.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Интересно сравнить некоторые представленные в этой работе характеристики землетрясения 19.08.2018 г. у о-вов Тонга с таковыми Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г.,  $M_W = 8.3$ . На рис. 11 представлена карта афтершоков Охотоморского землетрясения первых суток после главного события, всего 62 афтершока ( $M_W \geq 3.0$ ); интервал глубин  $460 \leq h < 700$  км. При этом использовался Региональный каталог землетрясений Камчатки КФ ЕГС РАН [<http://www.emsd.ru>].

Представляется, что очаг землетрясения оконтуривается наиболее плотным скоплением афтершоков в северной части их облака, ограниченными координатами  $53.70^\circ \leq \varphi \leq 55.1^\circ$ ,  $152.90^\circ \leq \lambda \leq 155.3^\circ$ . Распространяющийся далее к югу и юго-западу шлейф достаточно редко расположенных афтершоков уже вряд ли непосредственно относится к очагу Охотоморского землетрясения. При этом сильный афтершок 24.05.2013 г. ( $M_W = 6.7$ ), который произошел в 14 ч 56 мин, вероятно, также непосредственно не относится к очагу Охотоморского землетрясения. Отметим, что направленный на ЮЗ, в сторону сильного афтершока 14 ч 56 мин, шлейф редких афтершоков вместе с частью облака, которая рассматривается как очаг,

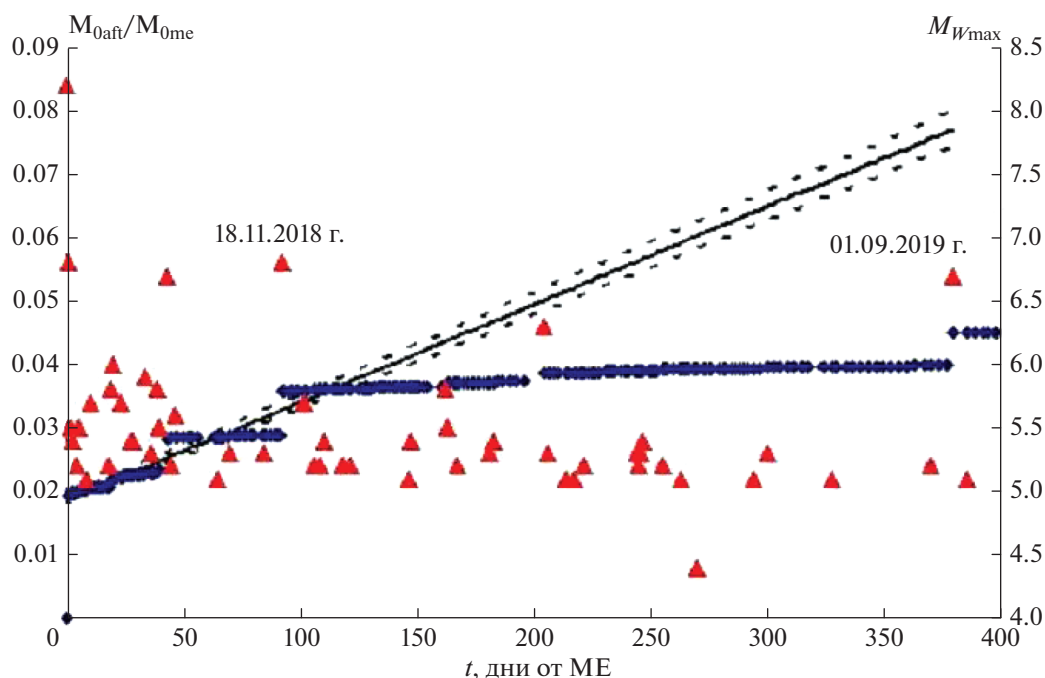


**Рис. 9.** (а) – Посуточный временной ряд высвобождения  $M_0$  в афтершоках в течение 1-го месяца после МЕ. Тонкой горизонтальной линией показан средний уровень фона; пунктирными линиями дан коридор стандартных отклонений. Треугольниками обозначены максимальные магнитуды (правая ось ординат) глубоких сейсмических событий ( $h \geq 400$  км) на каждом шаге дискретизации; (б) – первые 22 дня посуточного временного хода высвобождения  $M_0$  в афтершоках, перестроенного в билогарифмическом масштабе. На рисунок добавлены линии регрессии за первые 7 (сплошная прямая), 17 (пунктир с точками) и 22 дня (простой пунктир) афтершокового процесса.

образует достаточно причудливую фигуру, отчасти напоминающую запятую. Здесь надо заметить, что инструментальный очаг Охотоморского землетрясения 2013 г. расположен на северной границе области субдукции [Сильные..., 2014]. Поэтому весь сейсмический процесс распространяется только на юг и ЮЗ. Подобно зоне субдукции у о-вов Тонга и здесь достигший подошвы верхней мантии слэб Тихоокеанской плиты начинает течь на ЮЗ вдоль ее нижней границы, причем это течение в данном случае маркируется афтершоками “шлейфа”. Представляется, что нет оснований полагать, что этот вытянутый вдоль нижней границы верхней мантии “язык” афтершоков является частью очага Охотоморского зем-

летрясения. В пользу достаточно простой формы очага говорит и сравнительно небольшая его NDC-составляющая (см. ниже).

Следует отметить, что предложенное здесь выделение по афтершокам области очага не вполне совпадает с таковым в монографии [Сильные..., 2014, с. 60]. Согласно визуальной оценке, размеры очага оцениваются как  $L \approx 147$  км,  $W \approx 142$  км, что сопоставимо с размерами очага глубокого землетрясения 19.08.2018 г. у о-вов Тонга. Показательно, что и в случае Охотоморского землетрясения его очаг также имеет форму, близкую к изометрической. Если аппроксимировать очаг эллипсом с размерами осей  $L$  и  $W$ , то его площадь можно оце-



**Рис. 10.** Временной ход высвобождения кумулятивного (накопленного) скалярного сейсмического момента в афтершоках ( $M_{0aft}$ ) в долях от  $M_0$  Главного события ( $M_{0me}$ ). Сплошной прямой показана линейная регрессия, пунктирными линиями – коридор стандартных отклонений. Треугольниками обозначены афтершоки (вторая ось ординат).

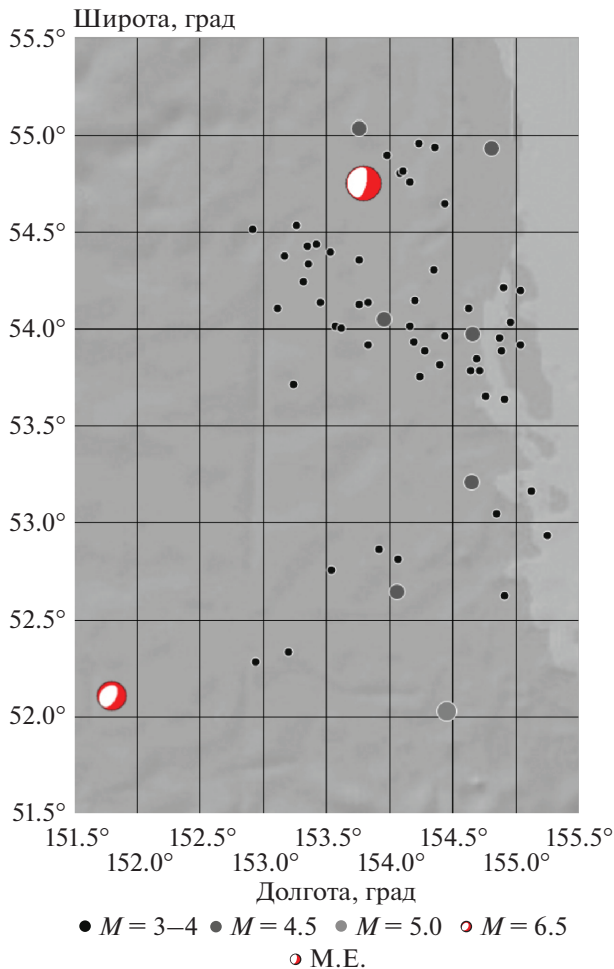
нить как 16.4 тыс. км<sup>2</sup>. Это почти в 2 раза меньше, чем приведенная в работе [Варга, 2017] оценка площади очага в 26.4 тыс. км<sup>2</sup>. В случае Охотоморского землетрясения центр тяжести эпицентров, характеризующих очаг, облака афтершоков ( $\varphi = 54.274^\circ$ ,  $\lambda = 154.058^\circ$ ) не совпадают с его инструментальным эпицентром с координатами  $\varphi = 54.75^\circ$ ,  $\lambda = 153.79^\circ$ , что, вероятно, обусловлено его близостью к северной границе зоны субдукции. При этом расхождение координат инструментального эпицентра и центра тяжести эпицентров облака афтершоков составило  $\Delta\varphi \approx 0.48^\circ$ ,  $\Delta\lambda \approx 0.27^\circ$ .

Согласно полученным нами оценкам, высвободившийся в афтершоках скалярный сейсмический момент  $M_{0aft} = 3.1 \times 10^{19}$  Н · м или около 0.78% от  $M_0$  главного события. Оценка продолжительности афтершокового процесса в соответствии с предложенным в работе [Лутиков, 2013] критерием отсутствия афтершоков (вплоть до нижней предельной магнитуды) в течение месяца составила около 10.5 мес. При этом если афтершоковая последовательность Охотоморского землетрясения сопоставима по продолжительности с афтершоковой последовательностью землетрясения 19.08.2018 г. у о-вов Тонга, то высвободившийся в ее ходе  $M_{0aft}$  в 5 раз меньше (в долях  $M_0$  главного события) от такового при афтершоковой последовательности землетрясения у о-вов Тонга.

На рис. 12 представлено распределение гипоцентров афтершоков Охотоморского землетрясения ( $M_I \geq 3.6$ ), построенное по 105 афтершокам [<http://www.emsd.ru>].

В этом случае в интервале глубин 550–700 км сосредоточено 75.5% афтершоков. Но заметное число гипоцентров афтершоков локализовано на глубинах 450–550 км (24.5%). В этом случае уже интервал глубин 550–700 км может ассоциироваться с верхней оценкой области локализации очага, то есть в этом случае очаг, вероятно, локализован на глубинах  $550 < h < 700$  км.

Механизм очага Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г. по данным СМТ-каталога также представлен на рис. 5 (справа). На первый взгляд может показаться, что левый и правый механизмы на рис. 5 похожи. Однако это не совсем так. При определении типа подвижки в очаге в сейсмологической практике обычно используется коэффициент Лоде–Надаи (LNK) в виде  $LNK = 3M_2/(M_1 - M_3)$ , где  $M_1 > M_2 > M_3$  – с.з. тензора сейсмического момента. При этом всегда  $M_1 > 0$ , а  $M_3 < 0$ . В случае наших землетрясений  $LNK = -0.177$  (о-ва Тонга), что соответствует режиму одноосного растяжения, и  $LNK = 0.137$  (Камчатка), что соответствует режиму одноосного сжатия. Очевидно, что разные знаки LNK никак не могут свидетельствовать в пользу одинакового типа подвижки в очагах этих землетрясений. Некоторое же сходство механизмов на стереограммах, при-

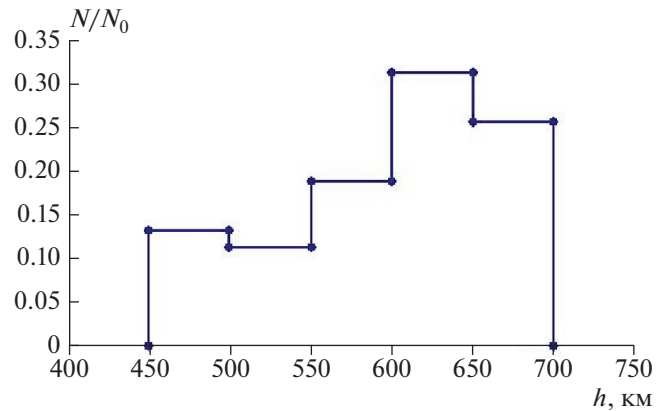


**Рис. 11.** Схема афтершоков глубокого Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г. ( $M_W = 8.3$ ,  $h = 630$  км). Первые сутки после времени в очаге главного события; всего 62 афтершока ( $M_W \geq 3.0$ ). Главное событие представлено механизмом очага (по данным СМТ-каталога). Стереограммой меньшего размера показан сильный афтершок 24.05.2013 г., 14 ч 56 мин ( $M_W = 6.7$ ).

веденных на рис. 5, обусловлено, вероятно, сравнительно небольшими абсолютными величинами LNK.

Исследование детерминанта тензора сейсмического момента [Лутиков, 2010] показывает, что детерминант тензора сейсмического момента, нормированного на скалярный сейсмический момент ([www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org)), с учетом матрицы ошибок  $\det(M_{ij}) = -0.0903 \pm 0.0044$  является гарантированно отрицательным и действительно характеризует режим одноосного сжатия, хотя величина NDC-составляющей здесь несколько меньше. Следовательно, механизм здесь – взрывового типа.

Сравнительный анализ афтершоковых полей двух сильнейших ( $M_W > 8.0$ ) за весь период инструментальных наблюдений глубоководных



**Рис. 12.** Распределение гипоцентров афтершоков Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г. ( $M_W = 8.3$ ,  $h = 630$  км) по глубине, построено по 106 афтершокам,  $M_I \geq 3.6$  [<http://www.emsd.ru>].

землетрясений, у о-вов Тонга 19.08.2018 г. и Охотоморского 24.05.2013 г. показал, что наряду с индивидуальными различиями между ними имеется важное сходство, выражающееся в близкой к изометрической форме их очагов. Общим является и то, что, судя по афтершоковым последовательностям первых суток, линейные размеры очагов этих землетрясений приблизительно в 2 раза меньше линейных размеров коровых землетрясений с такими же магнитудами.

Природа глубоких землетрясений до сих пор не вполне ясна. В частности, довольно подробный критический обзор возможных физических моделей возникновения глубоководных землетрясений содержится в работе [Лыскова, 2014]. Обычно предполагалось, что возникновение глубоководных землетрясений связано с фазовыми превращениями в нижней части верхней мантии [Калинин, 1989; Родкин, 2009]. В какой-то мере альтернативной является гипотеза об определяющей роли флюидной активности Земли, когда восходящие струи флюида взаимодействуют с веществом в окрестности будущей очаговой зоны. Определяющую роль при этом играют водородные интервенции в область будущего очага глубоководного землетрясения [Собисевич, 2014]. Представляется, что обе эти гипотезы не противоречат установленной здесь близкой к изометрической форме очага двух рассмотренных глубоководных сильнейших землетрясений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем полученные здесь основные результаты:

1. Установлено, что очаг сильного глубоководного землетрясения 19.08.2018 г.,  $M_W = 8.2$  у о-вов Фиджи и Тонга имеет близкую к изометрической

форму с верхними оценками его размеров по направлениям 155 км (С–Ю), 126 км (В–З), 130 км (З). Близкие оценки формы и размеров очага получены и для глубокого Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г.,  $M_w = 8.3$ . При этом, судя по афтершоковым полям первых суток, линейные размеры очагов этих землетрясений приблизительно в 2 раза меньше линейных размеров коровых землетрясений с такими же магнитудами.

2. Механизмы очагов землетрясений 19.08.2018 г.,  $M_w = 8.2$ ,  $h = 600$  км (слева) и Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г.,  $M_w = 8.3$ ,  $h = 611$  км гарантированно относятся к очагам НДС-типа, причем очаг землетрясения 2018 г. у о-вов Фиджи и Тонга может классифицироваться как сброс и характеризует режим одноосного растяжения. В то же время очаг Охотоморского землетрясения 2013 г. относится к взбросовому типу и характеризует режим одноосного сжатия.

3. Рассмотрение доступной сейсмической истории в предполагаемой области подготовки глубокого землетрясения 19.08.2018 г.,  $M_w = 8.2$  у о-вов Тонга показало, что его период подготовки, вероятно, заметно превосходит 100 лет.

4. Продолжительность афтершокового процесса глубокого землетрясения 19.08.2018 г.,  $M_w = 8.2$  у о-вов Тонга, конечно, с известной долей условности может быть оценена в 247 дней или приблизительно в 8 мес. Для Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г.,  $M_w = 8.3$  продолжительность афтершокового процесса оценена приблизительно в 10.5 мес., что сопоставимо с продолжительностью афтершокового процесса землетрясения у о-вов Тонга.

5. Высвободившийся в афтершоках глубокого землетрясения 19.08.2018 г.,  $M_w = 8.2$  у о-вов Тонга  $M_0 \approx 9.85 \times 10^{19}$  Н · м или приблизительно 3.9% от  $M_0$  Главного события 19.08.2018 г. Такая оценка вполне соответствует, например, полученной ранее средней оценке для коровых Курило-Камчатских землетрясений, что вряд ли типично для глубоких землетрясений. В частности, для глубокого Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г.,  $M_w = 8.3$  высвободившийся в афтершоках  $M_0 \approx 3.1 \times 10^{19}$  Н · м или около 0.78% от  $M_0$  главного события, что в долях  $M_0$  главного события в 5 раз меньше, чем для землетрясения у о-вов Тонга.

6. Установлено, что аналог закона Омори в терминах высвобождения  $M_0$  для афтершоковой последовательности глубокого землетрясения 19.08.2018 г. года удовлетворительно соблюдается в течение первых 17 дней после его начала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Варга П., Рогожин Е.А., Шулёв Б., Андреева Н.В. Оценка энергии, высвободившейся при сильнейших ( $M \geq 7$ )

глубокофокусных сейсмических событиях с учетом данных о землетрясении в Охотском море 24 мая 2013 г. ( $M_w = 8.3$ ) // Физика Земли. 2017. № 3. С. 62–87.

Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990 г. № 6. С. 55–64.

Калинин В.А., Родкин М.В., Томашевская И.С. Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. М.: Наука. 1989. 158 с.

Колобов В.Ю., Кулаков И.Ю., Тикунов Ю.В. Глубинное строение и геодинамическая эволюция Тонга-Новогебридского региона по данным сейсмической томографии // Геотектоника. 2003. № 2. С. 87–97.

Лукк А.А., Шевченко В.И. Островные дуги, глубокоководные желоба и сейсмофокальные зоны Индонезии и Тихого океана: сходство и различия // Физика Земли. 2008. № 2. С. 3–38.

Лутиков А.И., Донцова Г.Ю. Оценка линейных размеров очагов землетрясений Камчатки по размерам облака афтершоков // Физика Земли. 2002. № 6. С. 46–56.

Лутиков А.И., Юнга С.Л., Кучай М.С. Сейсмические источники, не удовлетворяющие модели двойного диполя: критерий выявления и распределение в островных дугах // Геофизические исследования. 2010. Т. 11. № 3. С. 11–25.

Лутиков А.И., Родина С.Н. Временные и энергетические параметры афтершокового процесса Курило-Камчатских землетрясений // Геофизические исследования. 2013. Т. 14. № 4. С. 5–17.

Лыскова Е.Л. Глубокофокусные землетрясения // Вопросы геофизики. 2014. Вып. 47. С. 62–74.

Миямура С. Сейсмичность Земли. Земная кора и верхняя мантия. М.: Мир. 1972. С. 93–103.

Родкин М.В. О процессе формирования “очага землетрясения”: новые данные и стохастическая модель развития неустойчивости // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10. № 1. С. 39–46.

Родкин М.В., Рукавишников Т.А. Процессы разупрочнения в окрестности сильных землетрясений и в зонах фазовых превращений в верхней мантии // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 3. С. 51–58.

Сильные камчатские землетрясения 2013 года / Чебров В.Н. Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. “Новая книга”. 2014. С. 252. ISBN 978-5-7750-298-7.

Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., Канониди К. Х. О механизме формирования очагов глубокофокусных землетрясений // Докл. РАН. 2014. Т. 459. № 1. С. 100–105.

Abe K. Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980 // Phys. Earth Planet. Inter. 1981. V. 27. P. 72–82.

Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from wave-form data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 2825–2852.

Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // Phys. Earth Planet. Inter. 2012. V. 200–201. P. 1–9.

<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>

Frohlich C. Characteristics of Well-Determined Non-Double-Couple Earthquakes in the Harvard CMT Catalog // Phys. Earth Planet. Inter. 1995. V. 91. № 4. P. 213–228.

- Frohlich C.* Deep Earthquakes. Cambridge University Press, New York. 2006. 573 p. ISBN-13 978-0-521-82869-7.
- Kagan Yan Y.* Accuracy of modern global earthquake catalogs // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2003. V. 135. P. 173–209.
- Hannington M.* East meets west: the cutting edge of Pacific Plate. 2019.  
<https://schmidtocean.org/cruise-log-post/east-meets-west-cutting-edge-pacific-plate/>
- Kanamori H.* Quantification of Earthquakes // *Nature.* 1978. V. 271. № 5644. P. 411–414.
- Myers S.C., Wallace T.J., Beck S.L., Silver P.G., Zandt G., Vandecar J., Minaya E.* Implications of spatial and temporal development of the aftershock sequence for the  $M_W = 8.3$  June 9, 1994 deep Bolivian earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 2269–2272.  
<https://doi.org/10.1029/95GL01600>
- McGuire J.J., Wiens D.A., Shore P.J., Bevis M.G.* The March 9, 1994 ( $M_W = 7.6$ ), deep Tonga earthquake: rupture outside the seismically active slab // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 15163–15182.  
<https://doi.org/10.1029/96JB033185>
- Omori F.* On the after-shocks of earthquake // *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo.* 1894 V. 7. P. 111–200.
- Utsu T.* A statistical study on the occurrence of aftershocks // *Geophys. Mag.* 1961. V. 30. P. 521–605.
- Wiens D.A., Gilbert H.J.* Effect of slab temperature on deep-earthquake aftershock productivity and magnitude-frequency relations // *Nature.* 1996. V. 384. P. 53–156.  
<https://doi.org/10.1028/384153a01>
- Wiens D.A., Gilbert H.J., Hicks B., Wysession M.E., Shore P.J.* Aftershock sequences of moderate-sized intermediate and deep earthquakes in the Tonga subduction zone // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24. P. 2059–2062.  
<https://doi.org/10.1029/97GLO1957>
- Wiens D.A., McGuire J.J., Shore P.J., Bevis M.G., Draunidallo K., Prazad G., Helu S.P.* A deep earthquake aftershock sequence and implications for the rupture mechanism of deep earthquakes // *Nature.* 1994. V. 372. P. 540–543.  
<https://doi.org/10.1038/372540a0>
- Wiens D.A., McGuire J.J.* Aftershocks of the March 9, 1994 Tonga earthquake: the strongest known aftershock sequence // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 19067–19083.  
<https://doi.org/10.1029/2000JB900097>

## The August 19, 2018 ( $M_W = 8.2$ ) Strong Deep Earthquake West of the Tonga Islands in the Context of Developing Our Concepts of Deep Earthquakes

A. I. Lutikov<sup>a, b, \*</sup>, E. A. Rogozhin<sup>a, b</sup>, G. Yu. Dontsova<sup>a, b, \*\*</sup>, and V. N. Zhukovets<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

<sup>b</sup>*Federal Research Center—Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Obninsk, 249035 Russia*

\**e-mail: ail@ifz.ru*

\*\**e-mail: donzova@ifz.ru*

One of the strongest deep earthquakes of August 18, 2018,  $M_W = 8.2$ ,  $h = 600$  km off the Tonga Islands is analyzed. This earthquake is notable for having a powerful aftershock sequence, generally untypical of the deep earthquakes, which qualifies it as a unique seismic event. Based on the first-day aftershocks, a three-dimensional (3D) geometric model of the source is constructed, and the seismic history and peculiarities of the aftershock process are studied. In particular, the duration of the aftershock process and the amount of the scalar seismic moment released by the aftershocks are estimated. It is shown that the source of the earthquake of August 18, 2018 pertains to the NDC type. Some characteristics of the earthquake of August 18, 2018 are compared with those of the strong deep earthquake in the Sea of Okhotsk with  $M_W = 8.3$  that occurred on May 24, 2013 off the western coast of Kamchatka.

*Keywords:* deep earthquakes, aftershock sequence, focal mechanism, seismic moment tensor, aftershock scatter ellipse