

СТАТИСТИКА ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОКРЕСТНОСТИ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2011 ГОДА В ТОХОКУ (ЯПОНИЯ)

© 2020 г. А. А. Лукк¹, *, В. Г. Леонова¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: Lukk@ifz.ru

Поступила в редакцию 29.10.2018 г.

После доработки 21.03.2019 г.

Принята к публикации 25.03.2019 г.

На базе стандартного каталога ISC за время с 2001 по 2017 гг. выполнен статистический анализ совокупностей фокальных механизмов землетрясений в пространственно-временной окрестности эпицентральной зоны катастрофического сейсмического события 2011 г. с $M_w = 9.0$ в Тохоку (Япония). Установлено, что за 10-летний период, предшествовавший этому землетрясению, более 80% промежуточных осей (B) фокальных механизмов землетрясений в диапазоне глубин 0–65 км наклонены к горизонту не более, чем на 20° , и ориентированы преимущественно в азимутальном секторе 190° – 210° , в пределах которого заключено простираение Японского океанического желоба. При этом более 75% осей сжатия (P) наклонены к горизонту в диапазоне углов 5° – 35° и более 75% осей растяжения (T) наклонены в диапазоне углов 50° – 80° . Эта ориентация главных осей фокальных механизмов однозначно указывает на преобладание на указанных глубинах режима надвиго- либо поддвигообразования. Это соответствует хорошо известному тектоническому предположению о поддвижении Тихоокеанской океанической литосферной плиты под континентальную Охотскую плиту в районе Японских островов, приблизительно в близширотном направлении. Этому же типу фокального механизма соответствует меганадвиговая подвижка в очаге катастрофического землетрясения в Тохоку. Подобный тип фокального механизма наблюдался и для афтершоковой последовательности землетрясений, расположенных в окрестности поверхности, разделяющей висячее и субдуцирующее крылья сталкивающихся здесь литосферных плит, где и произошло катастрофическое землетрясение. Преобладающий глубинный диапазон таких землетрясений составляет 30–55 км. Вместе с тем, было установлено существование яркой особенности в афтершоковой последовательности этого события на малых глубинах (менее 20 км) в пределах прибрежной аккреционной призмы в виде нехарактерных для зон субдукции землетрясений со сбросовым типом фокального механизма. Их число составило около 70% от общего числа афтершоков. Предполагается, что появление афтершоков со сбросовым типом фокального механизма на малых глубинах в пределах аккреционной призмы связано с деталями внутреннего строения призмы и мощностью малопрочных терригенных осадков, затянутых в межплитное пространство в процессе субдукции литосферных плит. Эти детали определяют наблюдаемый характер релаксации накопленных тектонических напряжений из широкой окрестности призмы в компактную область их практически полной разрядки в процессе интенсивного косейсмического скольжения.

Ключевые слова: фокальные механизмы, режим надвиго- либо поддвигообразования, меганадвиговая подвижка, сбросовый тип фокального механизма.

DOI: 10.31857/S0002333720020052

ВВЕДЕНИЕ

Вблизи побережья Японии в окрестности г. Тохоку 11.03.2011 г. произошло одно из сильнейших за период инструментальных наблюдений катастрофическое землетрясение с $M_w = 9.0$. С момента возникновения этого меганадвига прошло немногим более 8 лет, но за это время появилось в печати много десятков научных публика-

ций, посвященных этому выдающемуся сейсмическому событию. Лишь их незначительная часть приведена в библиографии к настоящей работе.

Научная ценность этих публикаций базируется на обширном инструментальном комплексе самых современных наблюдений как задолго до события, так и после него. Комплекс включал самые плотные в мире сети сейсмических наблюдений как на

суше [Okada et al., 2004; Katsumata, 2011; Lay et al., 2011; Uchida, Matsuzawa, 2011; Yamamoto et al., 2014; Azuma et al., 2018], так и на дне Тихого океана в прибрежной зоне [Obana et al., 2012; Shinohara et al., 2012; Yamamoto et al., 2014; Ito et al., 2017; Azuma et al., 2018]; столь же плотные сети пунктов GPS [Geospatial..., 2011; Iinuma et al., 2012; Ozawa et al., 2012; Azuma et al., 2018], включая измерения смещений морского дна [Fujiwara et al., 2011; Kido et al., 2011; Sato et al., 2011]; гравиметрические данные [Wang et al., 2012]; повторные батиметрические измерения поверхности морского дна в широкой окрестности глубоководного Японского желоба [Tsuru et al., 2000; 2002]; данные о форме волны цунами, использовавшиеся для характеристики типа подвижки в очаге [Ide et al., 2011; Tsushima et al., 2011; Tsuji et al., 2011; Iinuma et al., 2012; Satake et al., 2013]; данные бурения морского дна [Ujiiie et al., 2013], позволившие авторам предположить, что мелководное косейсмическое скольжение было вызвано термическим нагнетанием непроницаемого богатого жидкостью смектита. Были выполнены измерения времен пробега рефрагированных и отраженных упругих волн на ряде сейсмических профилей, поперечных к желобу, и построение на основе этих данных глубинной скоростной структуры земной коры и верхней части подкорового слоя в области коллизии литосферных плит [Zhao et al., 2011; Nakahigashi et al., 2012; Shinohara et al., 2012; Yamamoto et al., 2014; Ito et al., 2017; Azuma et al., 2018], позволившие осуществить корреляцию между изменениями структуры аккреционной призмы и степенью косейсмического поверхностного скольжения вблизи осевой области океанического желоба.

Обширная многосторонняя геофизическая информация, полученная до и после возникновения этого меганадвига, привела к новому пониманию возникновения подобных событий в зонах субдукции литосферных плит и позволила разработать ряд моделей блокировки и срабатывания столь крупных сейсмических событий в зонах коллизии литосферных плит [Iinuma et al., 2012; Ребецкий, Полец, 2014; Rebetsky et al., 2016; Sun et al., 2017; Wang et al., 2018].

Поскольку большие землетрясения, вероятно, производятся концентрацией напряжений в окрестности будущего разрыва сплошности среды, главный толчок служит разрядкой этих накопленных напряжений, и динамика их релаксации выражается в характере афтершоковой последовательности. Для понимания физической связи между главным толчком и его афтершоковой последовательностью важно изучить пространственно-временное распределение фокальных механизмов этих событий. Подобные исследования также были выполнены в связи с землетрясением в Тохоку, например, в работах [Asano et al., 2011; Lin, Wu, 2012] по данным фокальных меха-

низмов за время с 01.06.2003 по 24.05.2011 гг. в первой работе и с января 1976 по ноябрь 2011 гг. во второй работе. Они показали, что разрушение меганадвига могло быть вызвано большим накоплением энергии деформации на поверхности субдуцирующей плиты во время блокировки области разрыва в межсейсмический период. Характер высвобождения этой энергии различался во внутриплитовой части разрыва, под ней и в верхней перекрывающей плите. Это нашло свое выражение в вариациях типов фокальных механизмов и формы реализованного суммарного сейсмического момента на разных глубинах и по латерали. Эти различия авторы указанных исследований объясняли различным механизмом релаксации накопленной деформации в пределах различных элементов структуры зоны субдукции.

Наиболее полно ситуация с фокальными механизмами афтершоков землетрясения в Тохоку до конца 2013 г. описана в работе [Nakamura et al., 2016]. Авторами был разработан новый метод для классификации типов подвижек при слабых землетрясениях, определение фокальных механизмов которых на основе традиционных методов затруднено. Для этого привлекались к рассмотрению более сильные землетрясения с близкими эпицентрами, волновые формы которых использовались для определения фокальных механизмов как этих событий, так и близких к ним слабых землетрясений. В результате удалось определить фокальные механизмы для почти 9 тыс. сейсмических событий за период с 1984 по 2013 гг. На их основе обсуждалось пространственное распределение типов подвижек до и после землетрясения 2011 г. в Тохоку. Изучались расположения сбросовых и надвиговых подвижек в очагах землетрясений относительно глубины поверхности субдуцирующей плиты до и после землетрясения в Тохоку. Если до землетрясения преобладали межплитовые надвиговые подвижки, то после него возросла роль сбросовых подвижек на малых глубинах в верхней висячей плите. При этом, в области больших величин косейсмического скольжения межплитная сейсмичность резко снизилась, вероятно, из-за падения касательного напряжения на границе плит в момент землетрясения, а за пределами этой области она резко возросла. Предполагается, что наблюдаемое при этом пространственное изменение соотношения типов фокальных механизмов обусловлено драматическим изменением условий внутриплитного сочленения при землетрясении в Тохоку, создавшим неоднородное распределение напряжений вокруг его источника.

Несмотря на столь большое число исследований, посвященных катастрофическому землетрясению в Тохоку, осталась, как нам представляется, не до конца освещенная область статистики параметров фокальных механизмов землетрясений

в пространственно-временной окрестности этого события, лишь частично затронутая в работе [Nakamura et al., 2016]. Заполнению этого пробела и посвящена наша скромная работа.

**Данные о фокальных механизмах
в пространственно-временной окрестности
катастрофического землетрясения 11.03.2011 г.
в Тохоку и результаты их анализа**

По данным стандартного каталога ISC оценивались характеристики фокальных механизмов в пространственно временной окрестности катастрофического землетрясения 11.03.2011 г. в Тохоку (Япония). Использовались преимущественно агентства HRVD и NICE. Пространственная выборка фокальных механизмов для настоящего исследования приведена на рис. 1. Она определялась областью основных афтершоков этого землетрясения (один из примеров которой приведен на рис. 1), заключенной преимущественно в пределах $35-40^\circ$ с.ш. и $140-145^\circ$ в.д. (рис. 1). Временной интервал оцениваемых характеристик фокальных механизмов составлял 2001–2017 гг. Глубинный интервал ограничивался 65-ю км, поскольку глубина погружения субдуцирующей Тихоокеанской плиты под восточным побережьем Японии не превышает этой глубины по свидетельству большинства исследователей ([Hasegawa et al., 2011; Zhao et al., 2011; Asano et al., 2011; Kawamura et al., 2013; Nakamura et al., 2016]).

Строились гистограммы наклонов и азимутов простирания для всех трех осей фокальных механизмов в форшоковый и афтершоковый периоды. За форшоковый период мы принимали временной интервал с 01.01.2005 по 11.03.2011 гг. За временной интервал основной совокупности афтершоков принимался период с 11.03.2011 по 31.12.2011 гг.

На рис. 2 приведены гистограммы углов наклона с горизонтом и азимутов простирания главных осей сброшенных напряжений для всех выбранных за этот период из каталога ISC фокальных механизмов в интервале глубин 0–65 км. Согласно этому рисунку около 85% фокальных механизмов землетрясений в этот период времени характеризуются малыми углами наклона с горизонтом (менее 30°) промежуточных осей (B), ориентированными преимущественно в диапазоне азимутов $180^\circ-210^\circ$. При этом оси сжатия (P) преимущественно близгоризонтальны (углы наклона менее 40°) и ориентированы примерно ортогонально к осям B , а оси растяжения (T) близвертикальны (углы наклона более 50°). Подобная взаимная ориентация трех главных осей в рассматриваемой совокупности фокальных механизмов подразумевает четкое преобладание в рассматриваемом регионе на указанных глубинах режима надвиго- либо поддвигообразования. Это соответствует хорошо известному тектоническому

предположению о пододвигании Тихоокеанской океанической литосферной плиты под континентальную Охотскую плиту в районе Японских островов приблизительно в близширотном направлении.

Чтобы убедиться, что продемонстрированный на рис. 2 режим сейсмотектонического деформирования отражает его долговременный характер, а не является эффектом возможного форшокового “упорядочивания” перед катастрофическим землетрясением, мы расширили рассмотрение гистограмм углов наклона и азимутов главных осей фокальных механизмов на предшествующий рассмотренному периоду времени с 2001 по 2004 гг. Соответствующие гистограммы приведены на рис. 3.

Вид гистограмм оказался практически неизменным по отношению к приведенным на рис. 2. Это может быть рассмотрено как свидетельство устойчивого вида сейсмотектонического деформирования за сравнительно долгий период времени, предшествовавший катастрофическому землетрясению в Тохоку.

Вид средних фокальных механизмов, построенных в рамках методики Юнги С.Л. [1990] по двум совокупностям индивидуальных механизмов очагов землетрясений, описанным выше при рассмотрении рис. 2 и рис. 3, и определяющих тип сейсмотектонической деформации в эти два сопоставляемые интервала времени, приведен на рис. 4. Численные значения для параметров полученных решений средних фокальных механизмов приведены соответственно в первых двух строках табл. 1.

Как видим, решения за два разные срока, предшествовавшие сильному землетрясению, практически идентичны. Мало отличимые от 0 значения коэффициента Лоде–Надаи μ_m предполагают, что в обоих временных интервалах сейсмотектоническое деформирование (СТД) осуществляется в виде пододвигания Тихоокеанской литосферной плиты под континентальную Охотскую плиту в районе Японских островов. Высокие значения коэффициента соответствия индивидуальных фокальных механизмов полученному решению для среднего механизма ($k = 0.74-0.81$) свидетельствуют в пользу высокой устойчивости полученной оценки.

На рис. 5 приведены распределения чисел землетрясений по глубинам их очагов как за весь срок с 2001 по 2011 гг., предшествовавший сильному сейсмическому событию (рис. 5а), так и в афтершоковый период с 11.03.2011 по 31.12.2011 гг. Следует заметить, что согласно рис. 5а более половины землетрясений, использованных для оценки типа сейсмотектонического деформирования за предшествовавший сильному сейсмическому событию период, произошли на глубинах

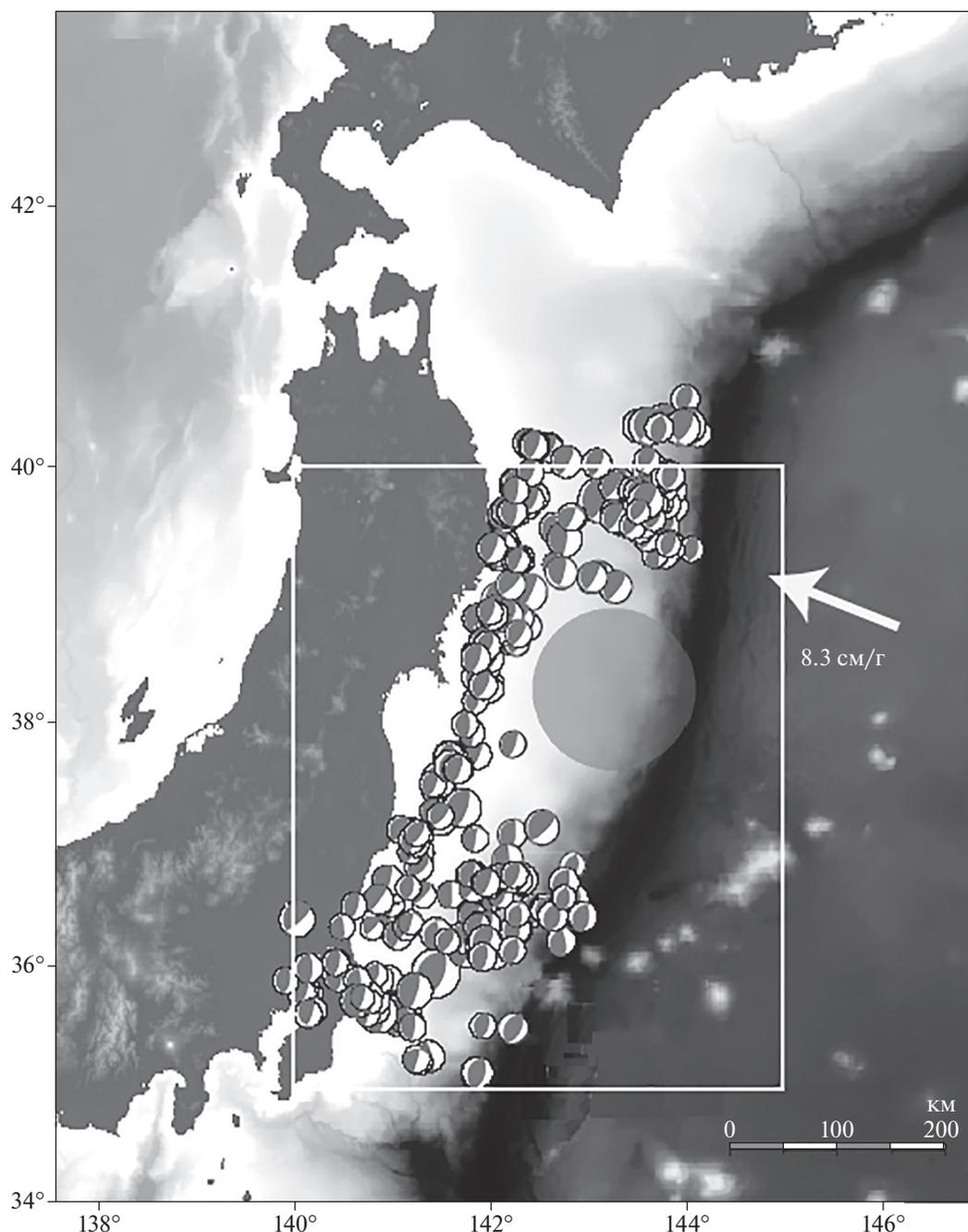


Рис. 1. Распределение внутриплитовых афтершоков с фокальными механизмами надвигового типа, которые произошли на границе висячей континентальной плиты и субдуцирующей океанической Тихоокеанской плиты в полосе шириной 20 км вокруг этой границы с момента главного толчка по 24.05.2011 г. Рисунок заимствован из работы [Kumagai et al., 2012, рис. 1b]. Большой круг в центре представляет собой источник катастрофического землетрясения ($M_w = 9$) 2011 г. в Тохоку. Показаны батиметрия вдоль Японского жёлоба и топография северо-восточной части Японии. Стрелка указывает вектор скорости сходимости Тихоокеанской плиты с Охотской плитой. Белой рамкой показана область выборки фокальных механизмов в настоящем исследовании.

более 30 км. Эта глубина для Японии принимается за нижнюю кромку земной коры [Nakahigashi et al., 2012; Lin, Wu, 2012; Shinohara et al., 2012; Yamamoto et al., 2014; Ito et al., 2017]. То есть определяющим в характере долговременного дефор-

мирования верхнего слоя кора–мантия для Японии является именно пододвигание Тихоокеанской литосферы под континентальную Охотскую плиту в окрестности Японских островов. Следовательно, межплитовые землетрясения составля-

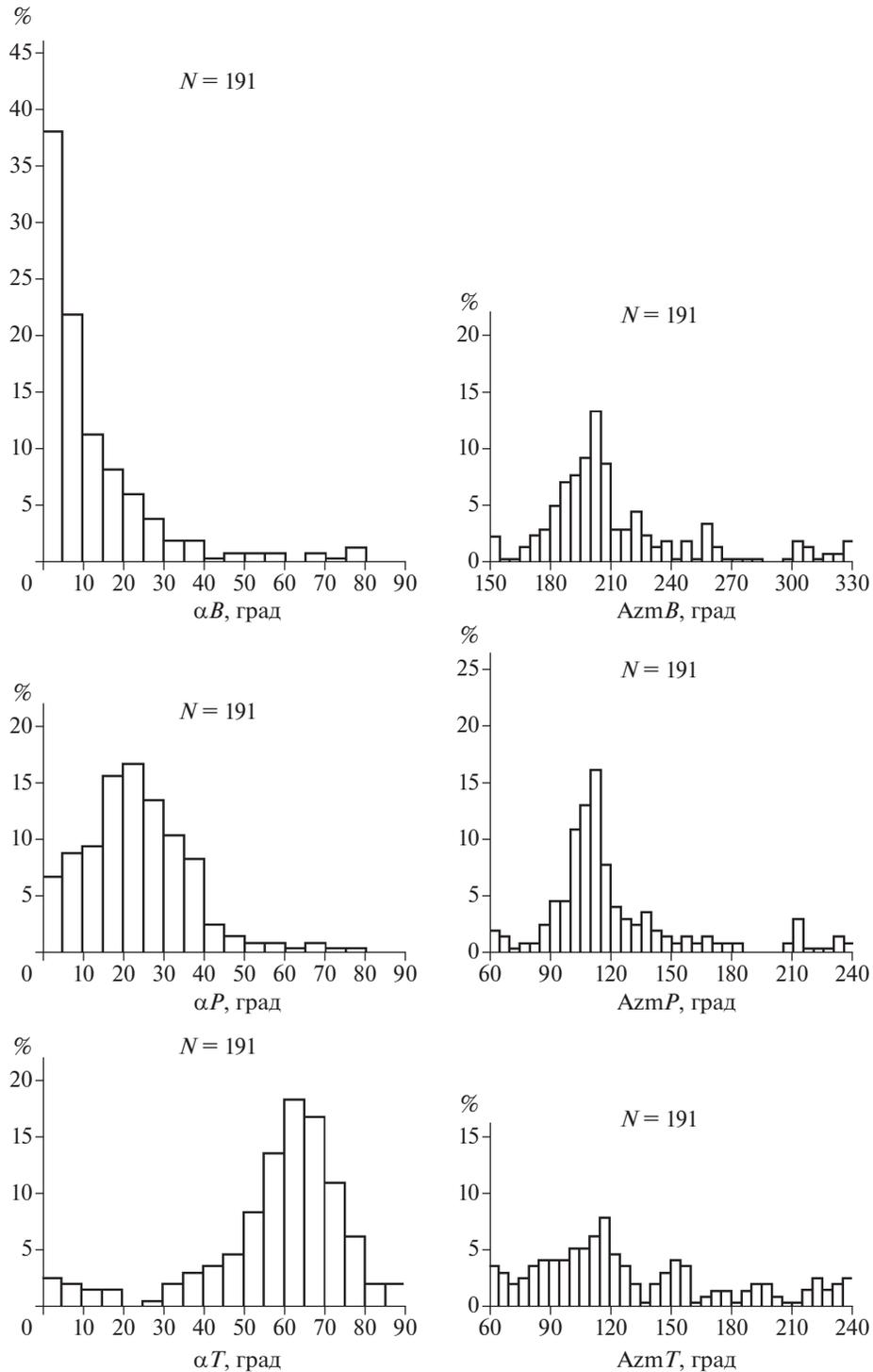


Рис. 2. Гистограммы углов наклона с горизонтом и азимутов простирания для осей *B* (промежуточная), *P* (сжатие) и *T* (растяжение) фокальных механизмов землетрясений в интервале глубин 0–65 км за период времени с 01.01.2005 по 11.03.2011 гг., предшествовавший катастрофическому землетрясению в Тохоку (Япония); *N* – число индивидуальных фокальных механизмов в оцениваемой выборке.

ют основу сейсмичности прибрежной акваторией Японии.

Мы уже отмечали высокую устойчивость СТД за длительный период времени до момента катастрофического землетрясения в Тохоку при рас-

смотрении средних фокальных механизмов, построенных в основном по сравнительно слабым сейсмическим событиям ($M \leq 6$). Добавим к этому, что и сравнительно сильные сейсмические события ($M = 6.6–7.2$), имевшие место в это время в

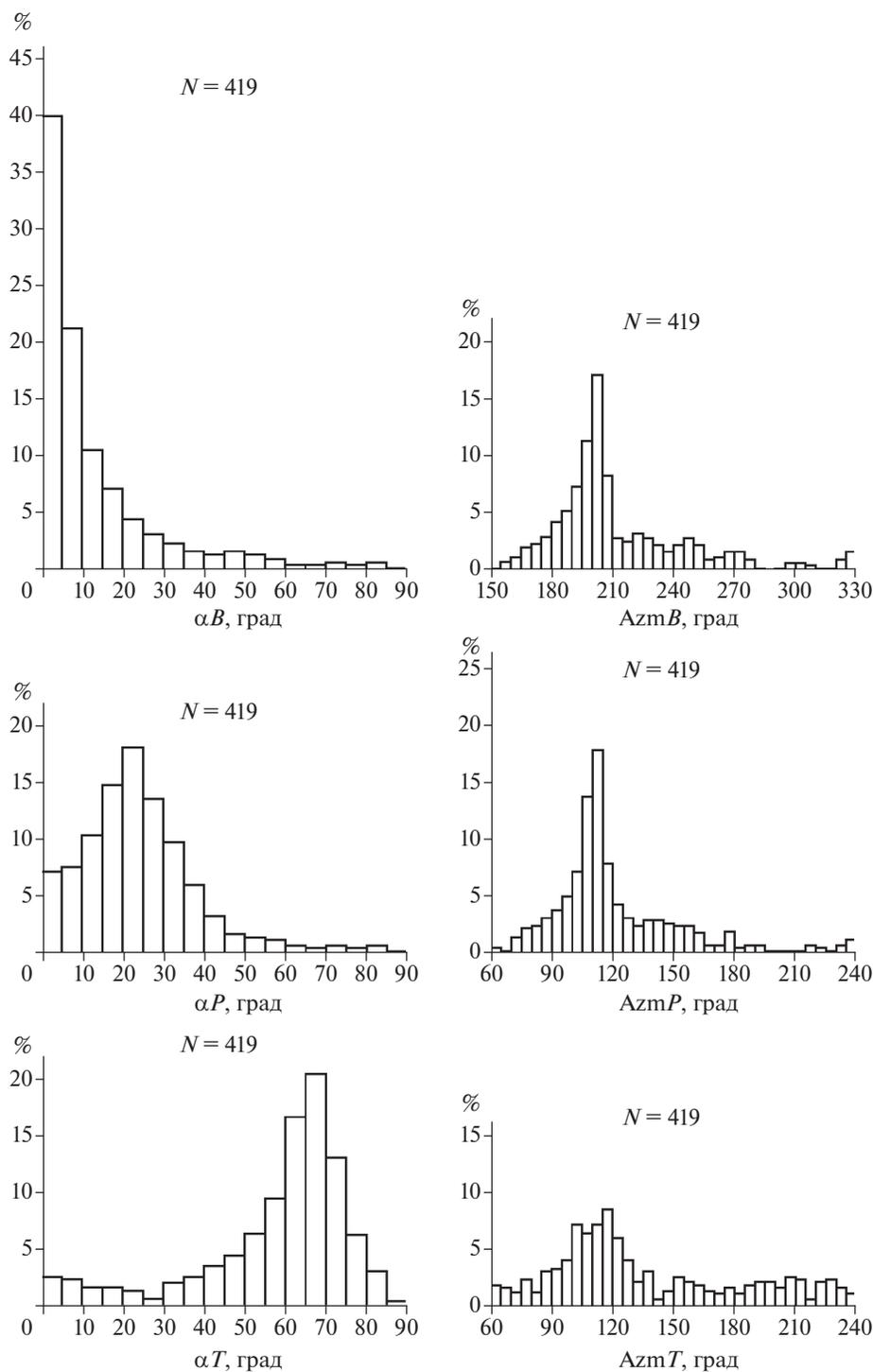


Рис. 3. Гистограммы углов наклона с горизонтом и азимутов простирания для осей B (промежуточная), P (сжатие) и T (растяжение) фокальных механизмов землетрясений в интервале глубин 0–65 км за период времени с 01.01.2001 по 31.12.2004 гг.

пределах рассматриваемой пространственной выборки, мало различались между собой по типу фокального механизма. Это продемонстрировано на рис. 6, где приведены фокальные механизмы для 7-ми таких землетрясений, включая достаточно сильный форшок ($M_w = 7.3$) 09.03.2011 г., по

данным стандартного каталога ISC. Параметры этих достаточно сильных землетрясений приведены в табл. 2. Все эти семь относительно сильных сейсмических событий представляют собой надвиги с близгоризонтальной ориентацией главных осей сжатия P в азимутальном секторе 109–

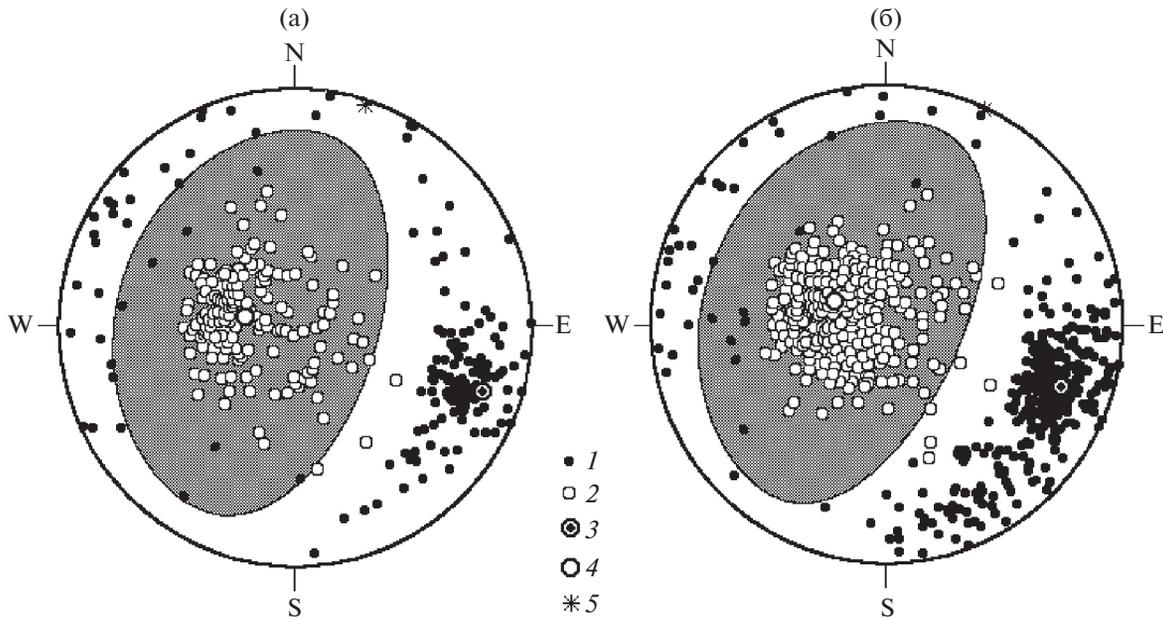


Рис. 4. Вид средних фокальных механизмов за два периода времени: (а) – 2001–2004 гг.; (б) – 2005–2011 гг.), предшествовавших катастрофическому землетрясению в Тохоку, построенных в рамках методики Юнги С.Л. [1990]: 1 – выход на нижнюю фокальную полусферу главных осей p (сжатия) индивидуальных фокальных механизмов; 2 – выход на нижнюю фокальную полусферу главных осей t (растяжения) индивидуальных фокальных механизмов; 3 – положение главной оси P полученного решения среднего механизма; 4 – положение главной оси T полученного решения; 5 – положение промежуточной оси B полученного решения. Зачернена на проекции фокальной полусферы область удлинения (растяжения).

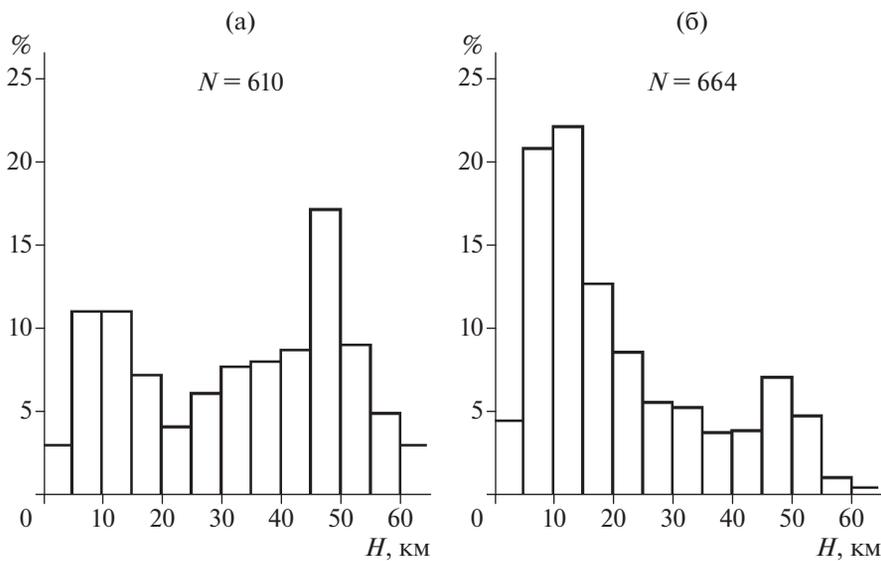


Рис. 5. Распределение гипоцентров землетрясений по глубине в пределах рассматриваемой пространственной выборки: (а) – в “форшоковый” период (2001–11.03.2011 гг.); (б) – в афтершоковый период (11.03.2011–31.12.2011 гг.)

132° и близвертикальной ориентацией главных осей растяжения T (в диапазоне углов наклона с горизонтом 57–86°). Они оказываются близки к характеристикам фокального механизма главного сейсмического события (выделенная жирным восьмая строчка в табл. 2).

Обратимся теперь к оценке вида сейсмотектонической деформации (СТД) в афтершоковой последовательности катастрофического землетрясения в Тохоку. На рис. 7 приведены гистограммы углов наклона с горизонтом и азимутов простираения для всех выбранных из стандартного

Таблица 1. Параметры решений для тензора среднего фокального механизма землетрясений в интервале глубин 0–65 км за разные сроки в окрестности катастрофического землетрясения в Тохоку

Срок	N	ось P		ось T		ось B		k	μ_M
		$AzmP$	αP	$AzmT$	αT	$AzmB$	αB		
2001–2004	160	109	18	282	70	018	02	0.74	–0.178
2005–2011	411	115	22	292	70	025	01	0.81	–0.15
11.03.2011–31.12.2011 (а)	291	112	22	294	70	203	01	0.83	–0.13
11.03.2011–31.12.2011 (б)	397	119	84	286	06	016	02	0.75	+0.63
2012 (а)	135	116	21	300	69	207	01	0.63	–0.288
2012 (б)	069	160	85	283	03	013	04	0.79	+0.222
2013–2014 (а)	138	118	20	298	70	208	00	0.75	–0.096
2013–2014 (б)	062	164	85	279	02	009	04	0.72	+0.446
2015 (а)	074	111	22	302	67	202	04	0.78	–0.157
2015 (б)	019	101	80	305	09	215	04	0.72	+0.556
2016–2017 (а)	088	112	20	298	69	203	02	0.79	–0.160
2016–2017 (б)	043	070	84	298	05	208	05	0.77	+0.274

Примечание: в первой колонке приведены временные интервалы построения тензора среднего механизма, подразделение на (а) и (б) соответствует разделению полной выборки индивидуальных фокальных механизмов на две: с $\alpha P \leq 40^\circ$ (а) и с $\alpha P > 40^\circ$ (б); N – число индивидуальных фокальных механизмов в данной выборке; Azm и α – соответственно азимут простираения и угол наклона с горизонтом для главных осей тензора среднего механизма – P (сжатия/укорочения), T (растяжения/удлинения), B (промежуточное); k ($0 \leq k \leq 1$) – параметр соответствия оцениваемой совокупности индивидуальных фокальных механизмов среднему решению; μ_M ($-1 \leq \mu_M \leq +1$) – коэффициент Лодэ–Надаи, определяющий тип сейсмодектонического деформирования от одноосного растяжения ($\mu_M = -1$) через сдвиг/скол ($\mu_M = 0$) до одноосного сжатия ($\mu_M = +1$).

каталога ISC фокальных механизмов в интервале глубин 0–65 км за время с 03.11.2011 по 31.12.2011 гг.

Согласно этому рисунку около 90% фокальных механизмов землетрясений в этот период времени характеризуются малыми углами наклона с горизонтом промежуточных осей B (менее 30°), ориентированными преимущественно в диапазоне азимутов 180 – 210° . В этом отношении эти характеристики аналогичны таковым в период времени, предшествовавший землетрясению. Но при этом в распределении углов наклона с горизонтом как для осей P , так и для осей T наблюдаются два четко выраженных экстремума вблизи 0 – 25° и 65 – 85° . Подобная взаимная ориентация трех главных осей в рассматриваемой совокупности фокальных механизмов подразумевает существование в афтершоковой последовательности двух режимов СТД – надвиго-поддвигового (преобладает субгоризонтальная ориентация главной оси укорочения (сжатия) P при субвертикальной ориентации главной оси удлинения (растяжения) T), идентичного режиму деформирования в форшоковый период, и сбросо-взбросового (преобладает субвертикальная ориентация оси P при субгоризонтальной ориентации оси T), нехарактерного для форшокового периода. Очевидно, что построение среднего фокального механизма для такой “двойной” совокупности индивидуальных фокальных механизмов оказывается бессмысленным в силу их несовместимости в рамках одного

совместного решения. Поэтому, согласно приведенному на рис. 7 распределению углов наклона главных осей индивидуальных фокальных механизмов мы разделили полную их выборку в афтершоковый период на две совокупности: с углами наклона с горизонтом осей P , равными и менее 40° , и с углами их наклона более 40° .

Построенные по этим двум выборкам тензоры средних фокальных механизмов приведены на рис. 8. Численные значения расчетных параметров этих тензоров приведены соответственно в третьей и четвертой строчках табл. 1. Полученные решения оказались очень устойчивыми, что хорошо видно как из практически полного разделения точек выхода индивидуальных осей p и t на проекции фокальной полусферы, так и согласно высоким значениям параметра k (0.75 – 0.83 в табл. 1). Поэтому выполненную выше процедуру разделения выборки индивидуальных фокальных механизмов в афтершоковой последовательности на две следует признать достаточно корректной.

Полученные решения принципиально отличаются друг от друга. Решение 8а описывает надвиго-поддвиговый режим сейсмодектонической деформации (СТД), практически полностью соответствующий долговременному типу СТД в предшествующий землетрясению период времени (см. рис. 4). Решение 8б описывает сбросо-взбросовый режим СТД, возможную причину возникновения которого мы рассмотрим несколько позже.

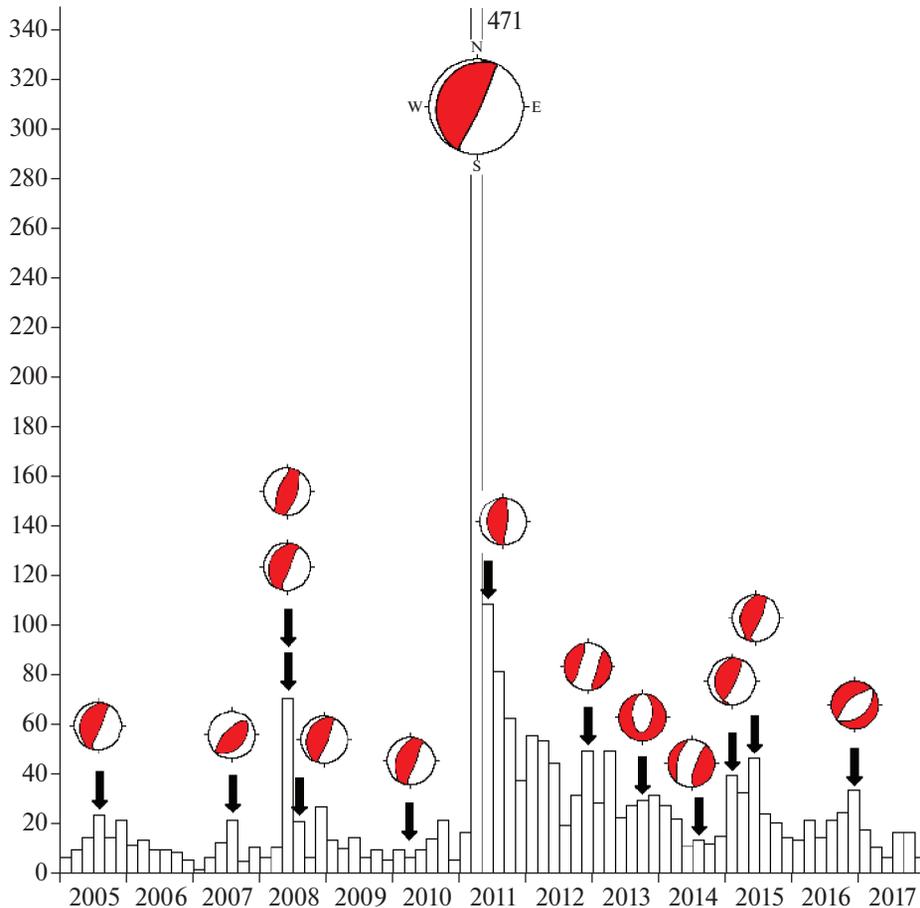


Рис. 6. Фокальные механизмы всех относительно сильных землетрясений с $M \geq 6.6$ в пределах рассматриваемой пространственной выборки на фоне временного ряда двухмесячных чисел землетрясений с определенными фокальными механизмами во временном интервале 2005–2017 гг.

Подобный двойной режим деформирования сохраняется достаточно долго после возникновения катастрофического землетрясения в Тохоку. Так на рис. 9 приведены гистограммы углов наклона для осей P и T за различные периоды времени после сильного землетрясения. Эти гистограммы аналогичны таковым для афтершокового периода за 11.03.2011–31.12.2011 гг., приведенным на рис. 7. Так что следует признать, что наблюдаемый нами “двойной” режим СТД продолжается, по крайней мере, до конца 2017 г. Соответствующие тензоры для средних механизмов за указанные на рис. 9 интервалы времени приведены на рис. 10. Численные значения параметров построенных решений приведены в 5–12 строчках табл. 1. Надежность построения средних фокальных механизмов достаточно высокая, о чем свидетельствуют как хорошее разделение точек выхода индивидуальных осей p и t на проекции фокальной полусферы, так и высокие значения параметра k (0.63–0.79 в табл. 1).

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АФТЕРШОКОВ С РАЗЛИЧНЫМ ТИПОМ ФОКАЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

Обратимся теперь к рассмотрению пространственного распределения афтершоков с различным типом фокального механизма. На рис. 11 показаны отдельно карты эпицентров афтершоков землетрясения в Тохоку (11.03.2011–31.12.2011 гг.) с надвиговым (рис. 11а) и сбросовым (рис. 11б) типом фокального механизма. Ниже на рис. 11в и 11г показаны соответственно распределения по глубинам афтершоков с такими типами механизмов. Если землетрясения с надвиговым типом фокального механизма достаточно равномерно заполняют широкую окрестность эпицентра разрушительного землетрясения (показанного на рис. 11 в виде кружка с надвиговым типом подвижки), включая область максимальных значений косейсмического скольжения, установленную по геодезическим данным [Geospatial..., 2011], то афтершоки со сбросовым типом подвижки как бы “избегают” этой области. При этом ги-

Таблица 2. Сильные землетрясения в окрестности катастрофического землетрясения 2011 г. в Тохоку (Япония)

Дата	Время	Координаты		H , км	M_w	Фокальный механизм					
						P		T		B	
		с.ш.	в.д.			Azm	α	Azm	α	Azm	α
2005-08-16	02:46	38.240°	142.050°	37	7.2	111	29	298	61	203	03
2007-07-16	01:13	37.500°	138.470°	12	6.6	312	15	146	74	043	03
2008-05-07	16:45	36.180°	141.610°	26	6.8	113	30	292	60	023	00
2008-06-13	23:43	39.030°	140.850°	12	6.9	298	03	137	86	019	02
2008-07-19	02:39	37.470°	142.420°	22	6.9	112	29	293	61	202	01
2010-03-14	08:08	37.700°	141.980°	46	6.6	110	21	291	69	200	00
2011-03-09	02:45	38.560°	142.780°	14	7.3	109	33	294	57	201	02
2011-03-11	05:47	37.520°	143.050°	20	9.0	115	35	295	55	205	00
2012-12-07	08:18	37.770°	143.830°	20	7.2	107	85	288	05	198	00
2013-10-25	17:10	37.170°	144.660°	25	7.1	347	78	093	03	183	11
2014-07-11	19:22	36.970°	142.390°	12	6.6	310	70	107	19	200	07
2015-02-16	23:06	39.780°	143.220°	22	6.7	110	28	306	61	204	07
2015-05-12	21:13	38.890°	142.290°	44	6.8	109	23	307	66	202	07
2016-11-21	20:59	37.310°	141.460°	12	6.9	135	80	318	10	228	01

Примечание: H – глубина очага; M_w – моментная магнитуда; Azm и α – соответственно азимут простираения и угол наклона с горизонтом для главных осей фокальных механизмов – P (сжатия/укорочения), T (растяжения/удлинения), B (промежуточного).

поцентры последних расположены преимущественно на малых глубинах в земной коре (<20 км), как бы прижимаясь к побережью Хонсю согласно рис. 11г, тогда как землетрясения с надвиговым типом подвижки располагаются в нижней части коры и в верхней мантии с максимумом в интервале глубин 45–55 км.

На рис. 12 приведено вертикальное сечение этой области афтершоков в широтной полосе 36.5–39.5° с.ш., в пределах которой содержится и область максимальных величин косейсмического скольжения. Из сопоставления рис. 11г и рис. 12 следует, что практически все афтершоки со сбросовым типом подвижки в очаге располагаются к западу от 143 меридиана в пределах земной коры, и пространственно отделены от афтершоков с надвиговым типом фокального механизма, располагающихся здесь на существенно больших глубинах. Отсутствие афтершоков в интервале глубин 0–10 км надо рассматривать как артефакт, обусловленный малой точностью локации гипоцентров службой ISC в море из-за отсутствия там постоянных сейсмических станций.

Надо отметить, что столь четкого разделения в пространстве афтершоков землетрясения в Тохоку с разным типом фокальных механизмов, которое демонстрируется на рис. 11, не наблюдается в работах японских авторов [Asano et al., 2011; Lin, Wu, 2012; Nakamura et al., 2016; Azuma et al., 2018]. Правда, следует заметить, что в каждой из пере-

численных здесь публикаций используются различные каталоги фокальных механизмов, сгенерированные с использованием различных методов инверсии, за разные сроки наблюдений, с использованием дополнительной информации по слабым землетрясениям, не вошедшим в стандартный каталог ISC, данными которого мы здесь пользовались при своих построениях. Это отчасти может служить объяснением отсутствия идентичности между нашими и цитируемыми результатами. Хотя такие характеристики, как: 1 – преобладание надвиговых типов фокальных механизмов в очагах межплитных землетрясениях задолго до главного толчка; 2 – появление многочисленных землетрясений со сбросовым типом механизма в их очагах в верхних 10–15 км земной коры в пределах верхней плиты; 3 – существенное ослабление сейсмичности афтершоков в зоне высоких значений косейсмического скольжения, устанавливаемых в окрестности очага меганадвиги по геодезическим данным, в целом отмечаются как в нашем, так и в цитируемых исследованиях.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Установление в широкой окрестности эпицентральной области катастрофического землетрясения 2011 г. в Тохоку (Япония) обширной зоны столь больших величин косейсмического скольжения (рис. 11) оказалось далеко не тривиальным фактом. Сейсмологические и геологиче-

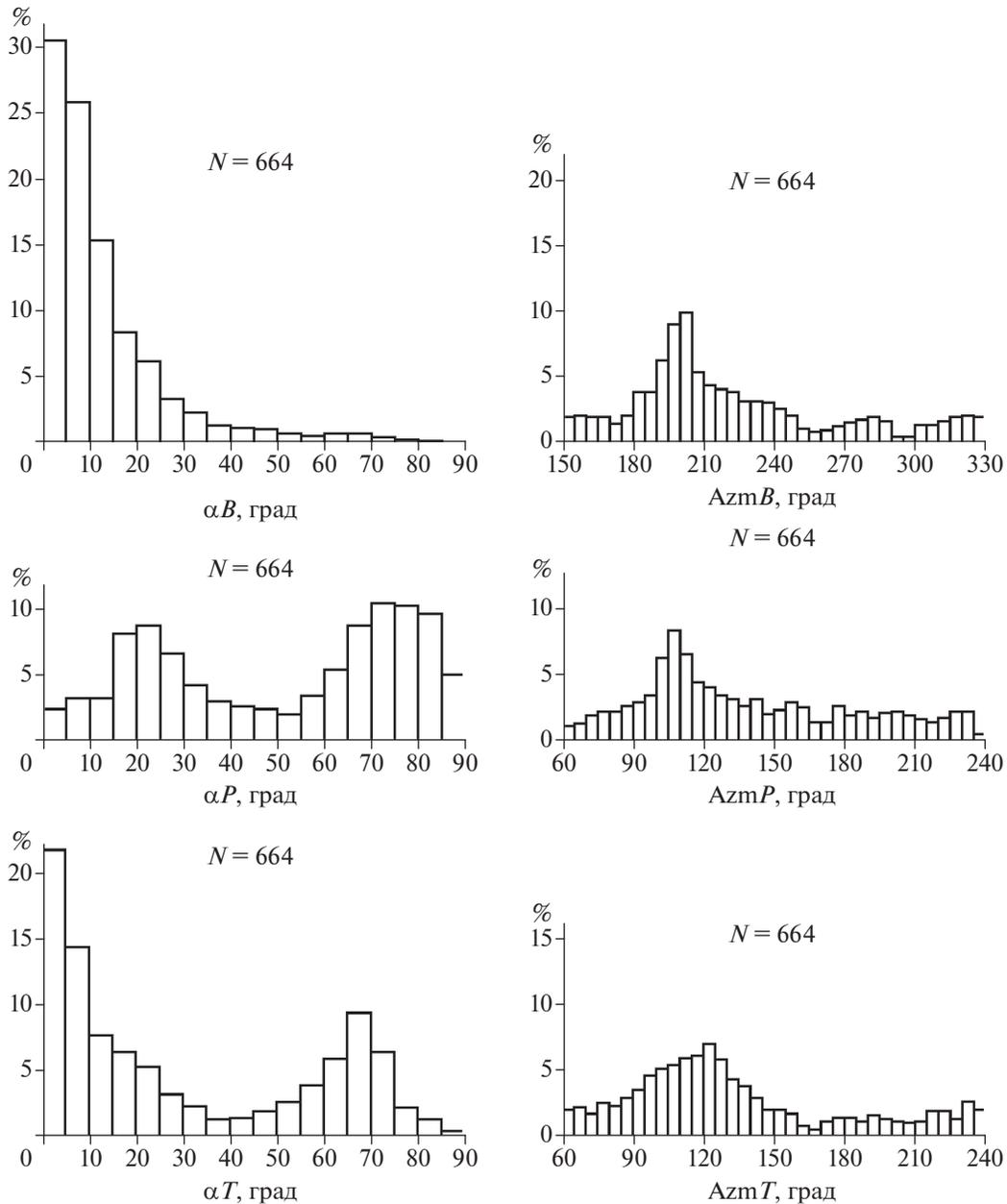


Рис. 7. Гистограммы углов наклона с горизонтом и азимутов простирания для осей *B* (промежуточная), *P* (сжатие) и *T* (растяжение) фокальных механизмов землетрясений в интервале глубин 0–65 км за афтершоковый период времени с 11.03.2011 по 31.12.2011 гг. после землетрясения в Тохоку.

ские исследования, выполненные на территории Японии до этого землетрясения в окрестности его будущего очага, привели к предположению, что в случае катастрофического события в зоне субдукции на этом участке сопровождающие его величины косейсмического скольжения не могут быть значительными ввиду низких величин жесткости неконсолидированных осадочных пород и малых коэффициентов трения во фронтальной части аккреционной призмы на внутреннем склоне желоба [Vilek, Lay, 1999; Tsuru et al., 2000; 2002], а также

малого уклона плоскости разрыва, влияющего на ширину фронтальной части аккреционной призмы [Scholz, 2002; Contreras-Reyes et al., 2010]. При этом делались ссылки на еще более сильное субдукционное Великое Андаманско-Суматранское землетрясение 2004 г. с магнитудой $M_w = 9.2$, при котором максимальная величина косейсмического скольжения не превышала 14 м при существенно большей протяженности области скольжения вдоль простирания желоба (см., например, [Wang et al., 2018]). Тем не менее, в реальности наблюда-

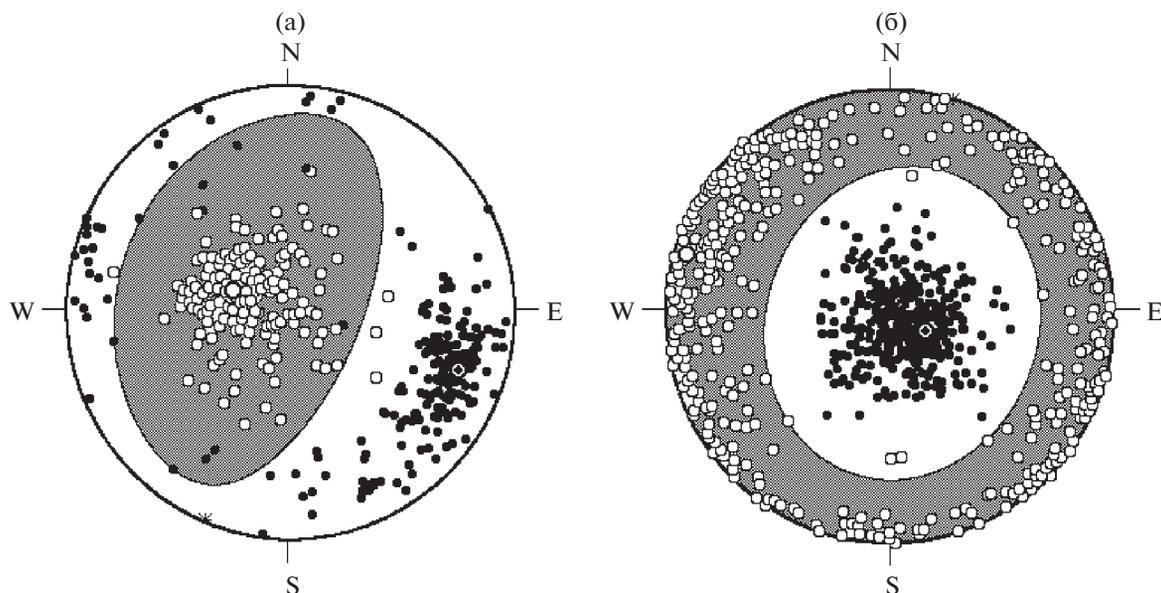


Рис. 8. Вид средних фокальных механизмов за афтершоковый период времени (11.03.2011–31.12.2011 гг.), построенных по двум отдельным выборкам с углом наклона осей P индивидуальных механизмов равным и менее 40° (а) и более 40° (б). Все обозначения соответствуют легенде на рис. 4.

лись очень высокие величины косейсмического скольжения (>50 м) в эпицентральной области катастрофического землетрясения в Тохоку.

Эту особенность землетрясения в Тохоку большой ряд исследователей связывает с особенностями подводной части геологической структуры прибрежной части Японии на малых глубинах вблизи выхода на поверхность разрывного нарушения при землетрясении. Было показано, что в пределах зоны максимальных величин косейсмического скольжения фронтальная часть аккреционной призм расположена много ближе к оси желоба по сравнению с участками, расположенными севернее и южнее этой зоны (севернее 39.5° с.ш. и южнее 36.5° с.ш. соответственно, см. рис. 11). При этом ширина аккреционной призм на этом участке восточнее префектуры Мияги существенно меньше (~ 300 км), чем на участках севернее и южнее его [Zhao et al., 2011; Shinohara et al., 2012; Tajima et al., 2013; Yamamoto et al., 2014; Asuma et al., 2018]. Структура этого участка аккреционной призм приведена на рис. 13 согласно работам [Tsuji et al., 2011; Tajima et al., 2013; Cubas et al., 2013].

Отличительной особенностью этого участка аккреционной призм является установленное в процессе детальной сейсмологической съемки с использованием рефрагированных и отраженных сейсмических волн на ряде плотных сейсмических профилей более высокие, по сравнению с соседними участками, значений скоростей распространения волн P и S на сравнительно малых глубинах в пределах аккреционной призм [Zhao et al., 2011; Tajima et al., 2012; Yamamoto et al., 2014;

Ito et al., 2017; Asuma et al., 2018]. Эти высокие скорости авторы цитируемых исследований связывают с более близко расположенной к желобу на этом участке тыльной части аккреционной призм с жестким ядром на малых глубинах, сложенной прочными породами мелового возраста (рис. 13). При этом фронтальная часть аккреционной призм, сложенная мягкими терригенными отложениями неогенового возраста [Tsuru et al., 2000; 2002] и смятая в складки по серии чешуйчатых надвигов (см. рис. 13), оказывается сильно сокращена по сравнению с аналогичными участками аккреционной призм, расположенными к северу и югу от обсуждаемого участка. К тому же срединная часть призм как бы нависает над фронтальной частью, перекрывая ее по пологому надвигу, называемому в англоязычной литературе как “backstop” (см. рис. 13), оказываясь существенно ближе к осевой части желоба. То есть “проскользнуть в желоб” в процессе меганадвига субдуцирующей плите оказывается более легко там, где фронтальная деформированная часть аккреционной призм более узкая [Asuma et al., 2018].

Наблюдаемое нами практически полное отсутствие афтершоков со сбросовым типом фокального механизма на малых глубинах (<20 км) в зоне максимальных величин косейсмического скольжения (рис. 11б) можно объяснить с позиций полной релаксации напряжений, накопленных в процессе подготовки землетрясения в Тохоку в пределах обсуждаемой аккреционной призм (в ее относительно жестких и прочных срединной и внутренней частях). Появление таких нетипич-

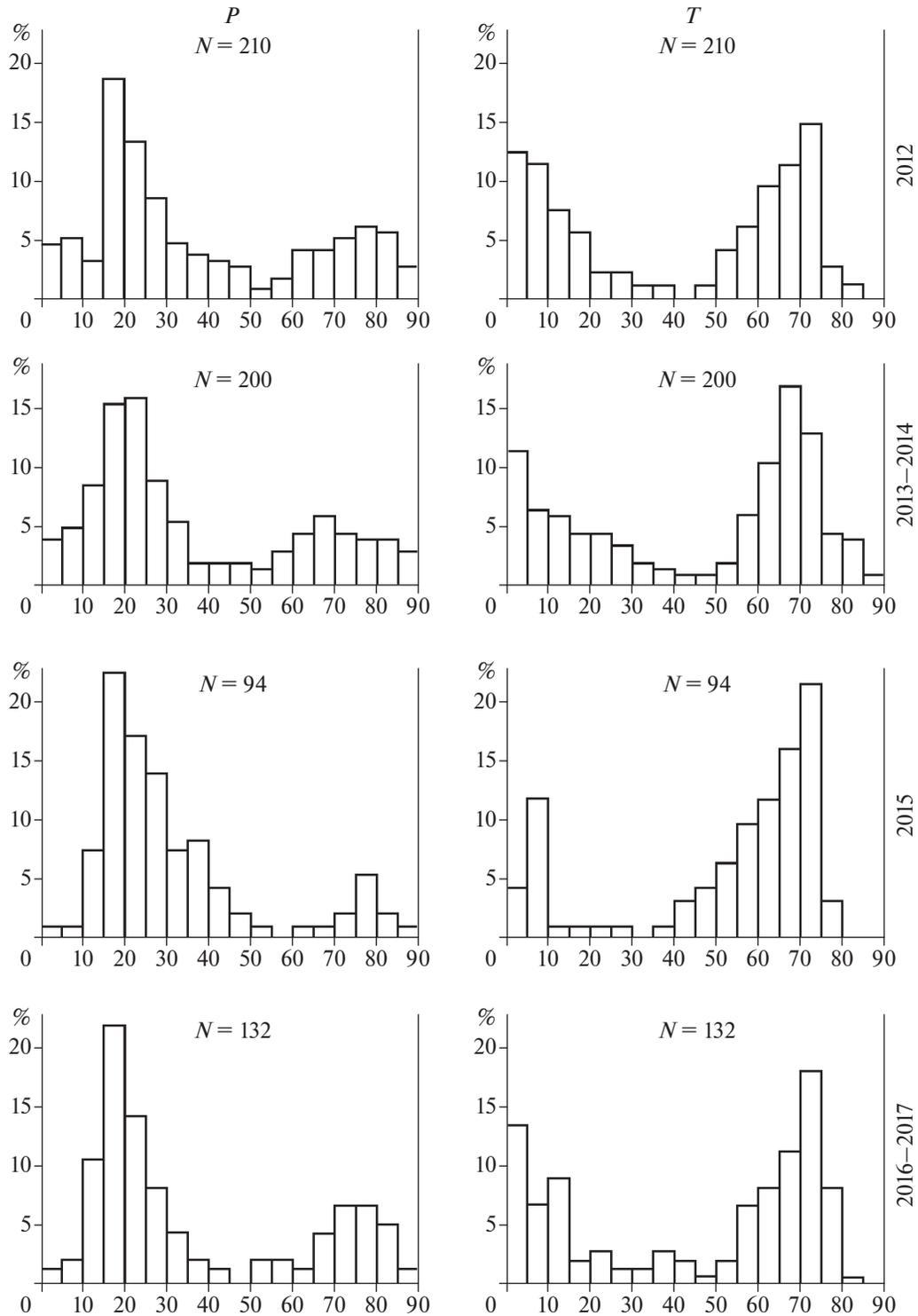


Рис. 9. Гистограммы углов наклона для осей *P* и *T* за различные периоды времени после сильного землетрясения в Тохоку.

ных афтершоков со сбросовым типом фокального механизма на малых глубинах в широкой окрестности обсуждаемой зоны релаксации упругих напряжений мы предлагаем объяснять с позиции возникновения при этом интенсивных субгори-

зонтальных растягивающих напряжений в окружающей эту зону верхней части земной коры. Именно эти растягивающие напряжения и обуславливают, по нашему мнению, возникновение нетипичных для зоны субдукции сбросовых подви-

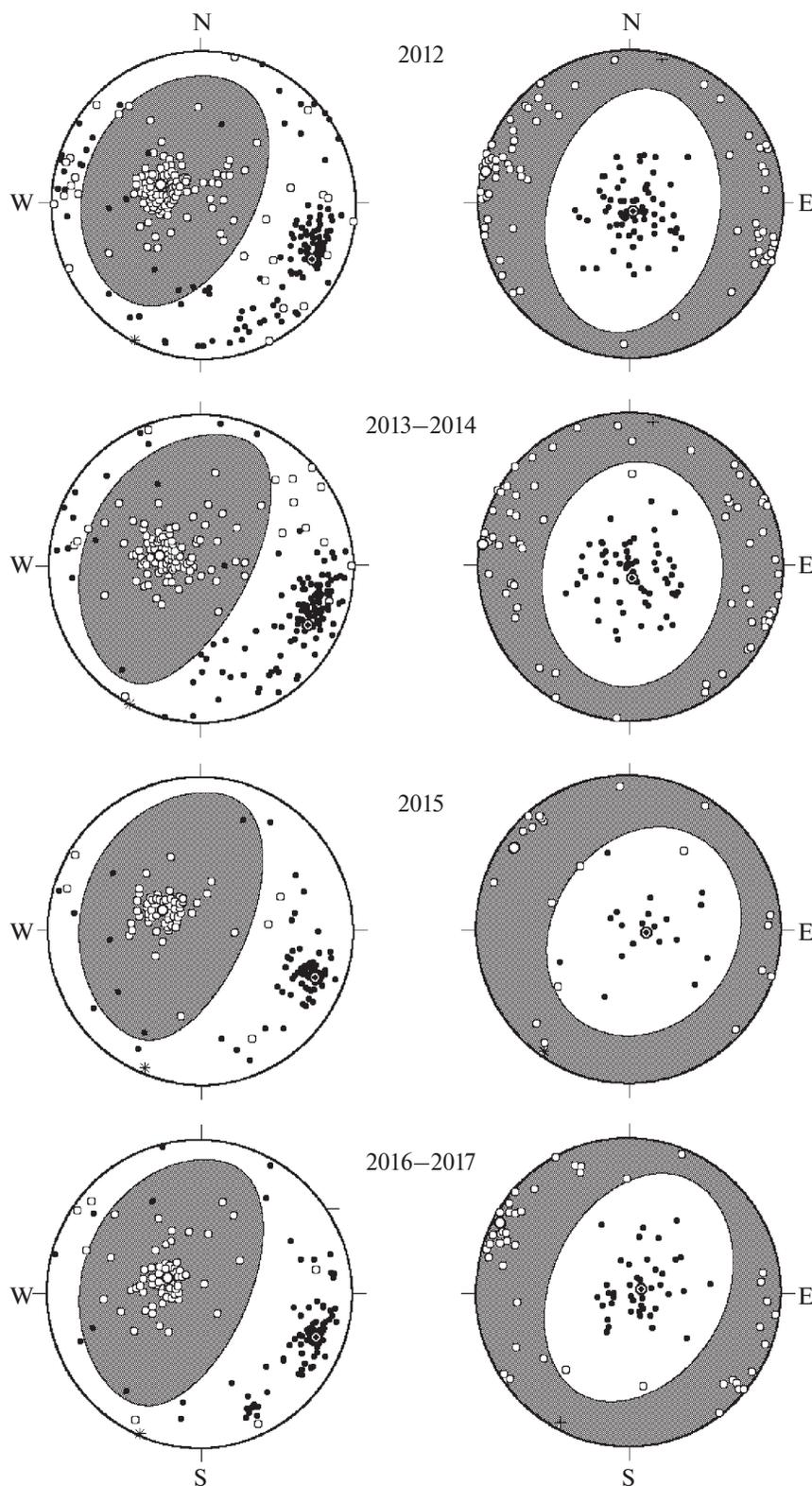


Рис. 10. Вид средних фокальных механизмов за 4 временных интервала после катастрофического землетрясения в Тохоку, построенных по двум отдельным выборкам: левая колонка — для выборки индивидуальных механизмов с углом наклона осей P , равным и менее 40° . Правая колонка — углы наклона осей P более 40° . Все обозначения соответствуют легенде на рис. 4.

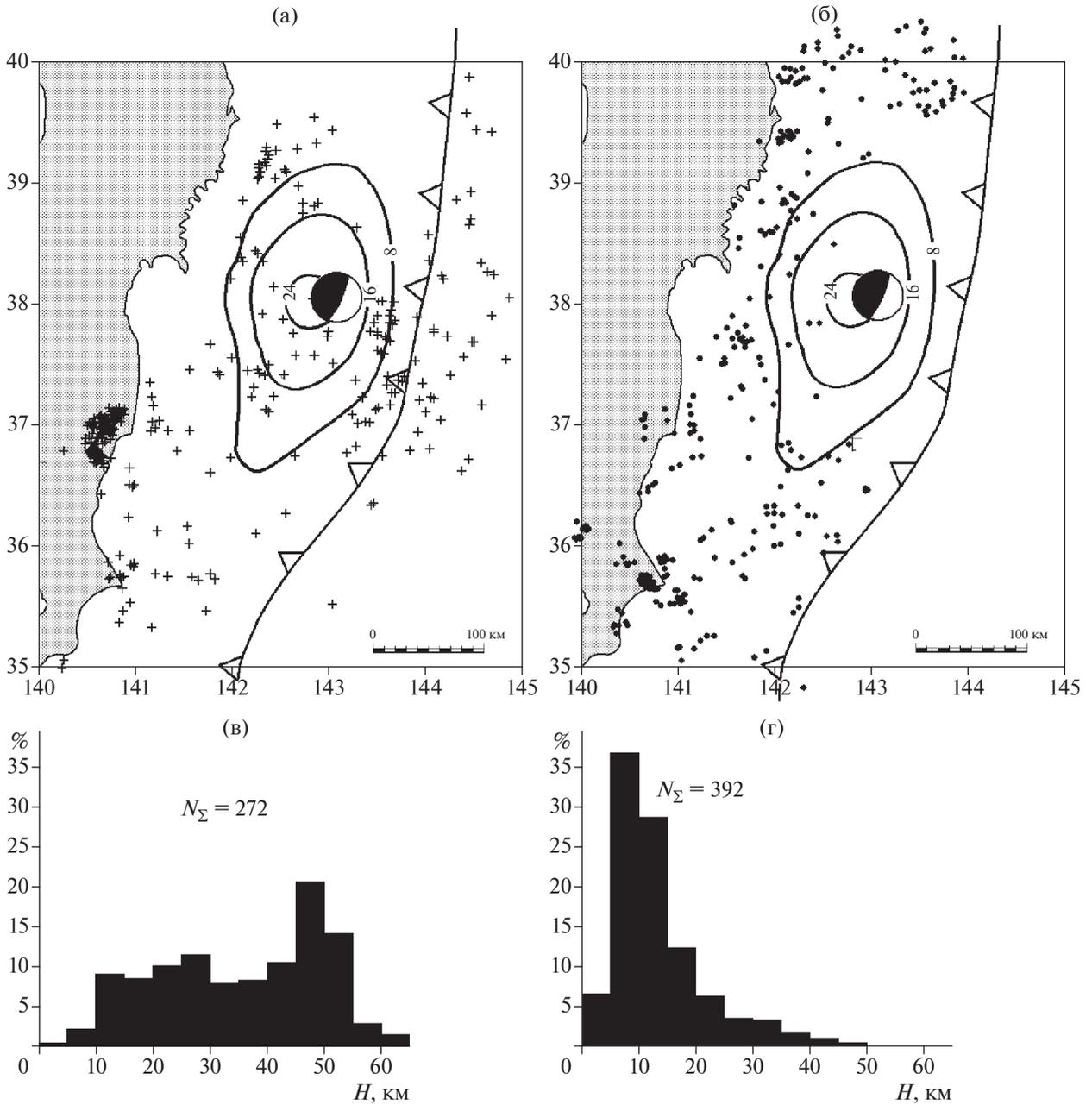


Рис. 11. Карта эпицентров афтершоков землетрясения в Тохоку (11.03.2011–31.12.2017 гг.) с надвиговым (а) и сбросовым (б) типом фокального механизма, и соответствующие им распределения по глубине их гипоцентров (в), (г), где N – общее число событий в данной выборке. Жирной линией с пустыми треугольниками обозначен глубоководный Японский желоб, в пределах которого осуществляется субдукция Тихоокеанской океанической литосферной плиты под Охотскую континентальную плиту. Жирными черными контурами обозначена область максимальных косейсмических скольжений (цифры в метрах) во время землетрясения в Тохоку [Iinuma et al., 2012]; в эпицентре землетрясения приведен фокальный механизм этого меганадвига согласно стандартного каталога ISC ([International...]). Затенена на рис. 11а и 11б сухопутная территория острова Хонсю, Япония.

жек в очагах афтершоков с глубинами менее 20 км, согласно рис. 11г и рис. 12, и составляющими около 70% от общего числа афтершоков, согласно рис. 5.

Следует заметить, что ориентация по азимуту этих субгоризонтальных растягивающих напряжений оказывается довольно хаотичной. Так, со-

гласно рис. 7, главные оси субгоризонтальных растяжений показывают лишь слабую упорядоченность в довольно широком азимутальном секторе 100–140°, приблизительно ортогональном простираению океанического желоба. Эту хаотичность можно связать с разрядкой в широком диа-

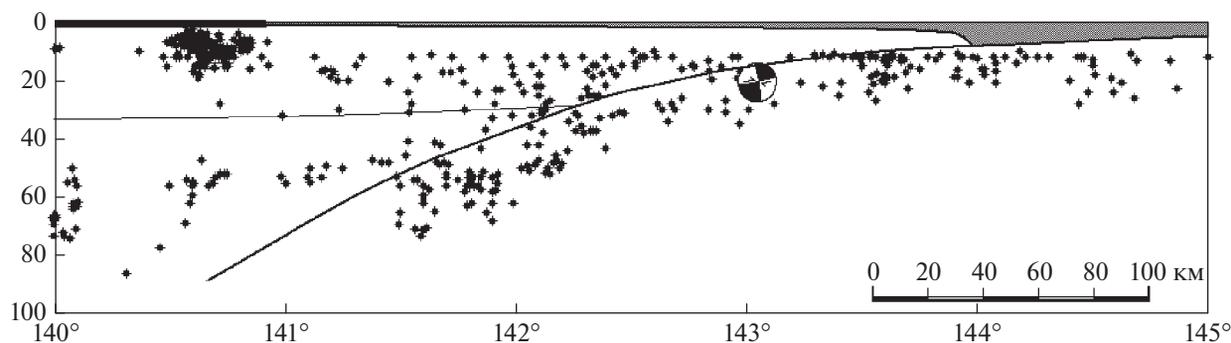


Рис. 12. Вертикальное сечение области афтершоков в широтной полосе 36.5–39.5° с.ш. Серым цветом показана акватория Тихого океана в окрестности глубоководного желоба, расположенного вблизи 144-го меридиана, жирной линией – поверхность субдуцирующей плиты. Все эти элементы приведены согласно [Yamamoto et al., 2014; рис. 2]. Тонкой линией показано условное положение подошвы земной коры согласно представлениям в работах [Nakahigashi et al., 2012; Lin, Wu, 2012; Shinohara et al., 2012; Yamamoto et al., 2014; Ito et al., 2017]. Главный толчок показан в виде изображения его фокального механизма в вертикальной плоскости, нормальной к желобу; стрелками на этом изображении показано направление смещения на разных бортах “рабочей” плоскости, расположенной вблизи поверхности субдуцирующей плиты.

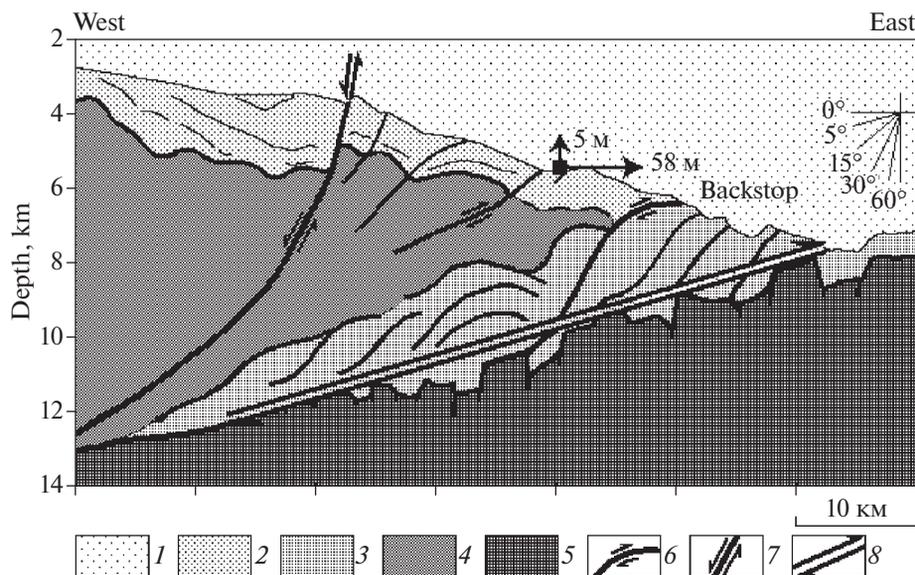


Рис. 13. Структура аккреционной призмы в области максимальных величин косейсмического скольжения морского дна при катастрофическом землетрясении 2011 г. в Тохоку (Япония). Масштаб по вертикали в 3 раза больше, чем по горизонтали. Модифицированный рис. 7d из работы [Tajima et al., 2013]: 1 – водная толща Тихого океана; 2 – верхний тонкий слой морских осадков; 3 – мягкие терригенные отложения неогенового возраста сильно деформированной фронтальной части аккреционной призмы; 4 – жесткое ядро аккреционной призмы мелового возраста; 5 – базальтовая кора субдуцирующей Тихоокеанской плиты; 6 – чешуйчатые надвиги во фронтальной части аккреционной призмы; 7 – сбросы в жестком ядре призмы; 8 – подвижка в очаге землетрясения в Тохоку на границе между висячей и субдуцирующей литосферными плитами со смещением около 80 м [Tajima et al., 2013]. Квадратик со стрелками показан один из GPS-пунктов на дне океана, с указанием величин горизонтальных и вертикальных компонент косейсмического смещения. *Backstop* – надвиговая структура, разделяющая сильно деформированную фронтальную часть призмы от более жесткой и прочной ее срединной части.

пазоне азимутов напряжений, накопленных в окружающем пространстве аккреционной призмы, в область больших величин косейсмического скольжения, где уровень напряжений теперь крайне низок.

Наблюдаемым в процессе этой разрядки сбросовым подвижкам в очагах афтершоков на малых глубинах можно увидеть реальное подтверждение в геологической структуре аккреционной призмы в виде сбросовых разломов, отделяющих среднюю

часть призмы от ее внутреннего жесткого ядра, один из примеров которых приведен на рис. 13. Тем самым, подобные разломы в аккреционной призме океанического побережья Японии можно считать носителями физической сущности неглубоких афтершоков катастрофического землетрясения 2011 г. в Тохоку с нетипичным для зон субдукции сбросовым типом фокального механизма.

В то же время следует заметить, что возникновение неглубоких афтершоков со сбросовым типом фокального механизма в эпицентральных зонах катастрофических субдукционных землетрясений далеко не обязательное проявление афтершокового процесса. Так, например, неизвестны сообщения о появлении столь же ярко выраженных последовательностей неглубоких афтершоков со сбросовым типом фокального механизма при таких катастрофических субдукционных землетрясениях как Суматранское 2004 г. с $M_w = 9.2$ (например, [Banerjee et al., 2007; Dewey et al., 2007; Лукк, Леонова, 2018]) и Чилийские 1960 г. с $M_w = 9.5$ и 2010 г. с $M_w = 8.8$ (см., например, [Contreras-Reyes et al., 2010]). В то же время очаги этих субдукционных землетрясений оказываются аналогичными землетрясению в Тохоку меганадвигами со слабо погруженной под континент плоскостью разрыва на контакте висячей и субдуцирующей плит, а мощные афтершоковые последовательности представлены в основном межплитными землетрясениями с надвиговым типом фокального механизма.

В этой связи уместно привести гистограммы углов наклона и азимутов простирания для трех главных осей фокальных механизмов в афтершоковой серии катастрофического Суматранского землетрясения 26.12.2004 г. с $M_w = 9.2$ (рис. 14). Как следует из этого рисунка, гистограммы в афтершоковый период (рис. 14б) практически неотличимы от таковых за предшествующий землетрясению период времени (рис. 14а). В обоих случаях наблюдается устойчивая близгоризонтальная ориентация главной оси сжатия (P) при двух преобладающих положениях (близгоризонтальном и близвертикальном) главной оси растяжения (T). Близвертикальное положение оси T соответствует надвиговому режиму, наибольшее преобладание которого отмечается в афтершоковый период в непосредственной окрестности межплитного меганадвигав, а близгоризонтальное положение оси T соответствует сдвиговому режиму, который реализуется во всем рассмотренном здесь временном интервале на протяженном Суматранском сдвиге, рассекающем западное побережье острова Суматры в Индонезии.

Остается неясным, в чем состоит суть столь существенных различий в наблюдаемых афтершоковых последовательностях при обсужденных здесь катастрофических меганадвигав в субдук-

ционных зонах. Есть соображения, что большую роль при этом играет геологическое строение аккреционной призмы и мощность затягиваемых осадков в межплитовое пространство [Contreras-Reyes et al., 2010; Lay et al., 2012; Tajima et al., 2012; Cubas et al., 2013; Azuma et al., 2018; Wang et al., 2018]. Так, например, в работе [Wang et al., 2018] существенные различия в интенсивности постсейсмического скольжения в эпицентральных зонах катастрофических землетрясений в Тохоку 2011 г. и на Суматре 2004 г. предлагается связывать с различиями в ширине фронтальной части аккреционной призмы. Компактный тип аккреционной призмы с фронтальной частью менее 300 км при землетрясении в Тохоку в отличие от протяженной фронтальной части Суматранского землетрясения выдвигаются в качестве возможной причины этих различий.

Процессы аккреции и субдукции осадков и последствия этих процессов для меганадвиговой сейсмичности детально рассматривались применительно к катастрофическим меганадвигам Чили в работе [Contreras-Reyes et al., 2010]. При этом относительно небольшой фронт аккреционной призмы вдоль сегмента Чили совпадал с областью разломов транс-тихоокеанского региона катастрофического цунамигенного землетрясения 1960 г. ($M_w = 9.5$), тогда как относительно протяженный фронт призмы вдоль сегмента Мауле совпадал с протяженностью разрыва при более слабом землетрясении 2010 г. ($M_w = 8.8$) для тихоокеанского побережья Чили. Разрывная область катастрофического Чилийского события 1960 г. также коррелировалась с относительно толстым межплитовым каналом субдукции, образованным затягиванием малопрочных осадочных отложений в межплитное пространство в процессе субдукции, что может обеспечить достаточную гладкость процесса субдукции, обеспечивающую длительное латеральное распространение разрыва при меганадвиговом землетрясении [Contreras-Reyes et al., 2010].

В работе [Tajima et al., 2012] на основе томографических изображений структурных образований, установленных по величинам скоростей волн P и S в пределах аккреционной призмы, демонстрируются тонкие изменения физических свойств, которые могут определять состояние сцепления литосферных плит на малых глубинах и представлять собой ключ к пониманию процесса разрыва меганадвигав при землетрясении в Тохоку.

Тем самым, надо признать, что геологическое строение аккреционной призмы в зоне сочленения литосферных плит может играть заметную роль как в процессе накопления упругих напряжений на стадии подготовки катастрофического землетрясения, так и на стадии их реализации. Одну из ярких сторон этой реализации мы видим

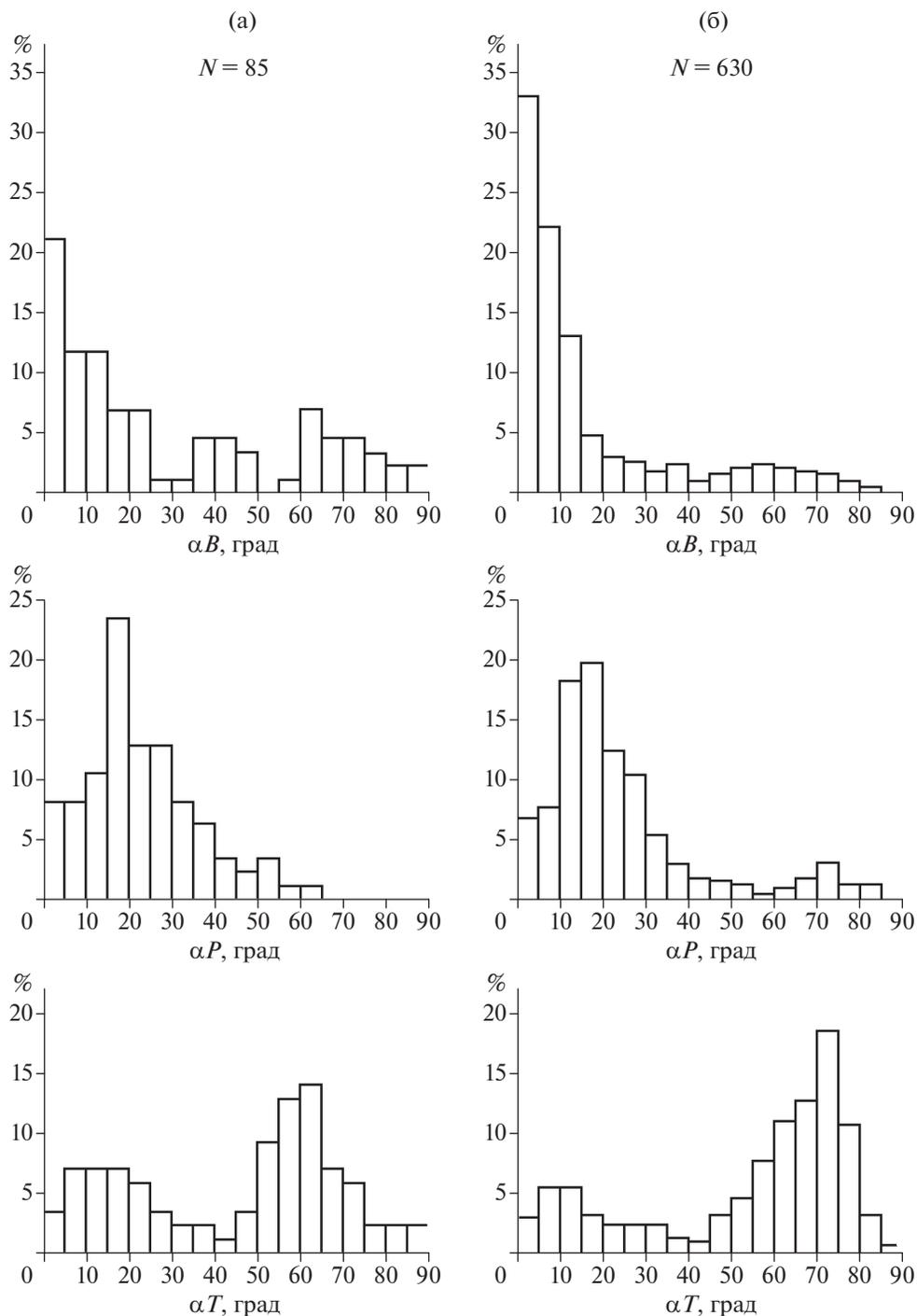


Рис. 14. Гистограммы углов наклона с горизонтом и азимутов простираения для осей B (промежуточная), P (сжатие) и T (растяжение) фокальных механизмов землетрясений в интервале глубин 0–65 км за период 1977–26.12.2004 г. до момента возникновения катастрофического Андаманско-Суматранского землетрясения 26.12.2004 г. с $M_w = 9.2$ (а) и за афтершоковый период времени с 26.12.2004 по 31.12.2005 гг. после него (б) в пределах пространственной выборки размером около 5 кв. град, определенной в работе [Лукк, Леонова, 2018]. Сведения о фокальных механизмах заимствованы из стандартного каталога ISC преимущественно в версии агентств HRVD и NICE.

в появлении в афтершоковой последовательности землетрясений на малых глубинах в пределах Японской аккреционной призмы со сбросовым типом фокального механизма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате статистического анализа совокупностей фокальных механизмов землетрясе-

ний в пространственно-временной окрестности эпицентральной зоны катастрофического сейсмического события 2011 г. с $M_w = 9.0$ в Тохоку (Япония) была установлена яркая особенность в афтершоковой последовательности этого события. В ней появились нехарактерные для зон субдукции землетрясения со сбросовым типом фокального механизма на малых глубинах (менее 20 км) в пределах прибрежной аккреционной призмы, составляющие около 70% от общего числа афтершоков. При этом сейсмические события в окрестности поверхности, разделяющей висячее и субдуцирующее крылья сталкивающихся здесь литосферных плит, обладали преимущественно надвиговым типом фокального механизма, аналогичным фокальному механизму катастрофического сейсмического события, как задолго до него, так и в афтершоковой последовательности на протяжении 7 лет.

Эта особенность не является тривиальным фактом, поскольку она не наблюдалась при столь же сильных катастрофических событиях на Тихоокеанском побережье Чили в 1960 и 2010 гг. (с $M_w = 9.5$ и с $M_w = 8.8$ соответственно) и на западном побережье острова Суматра в 2004 г. (с $M_w = 9.2$) в других зонах субдукции. При этом тип разрыва при всех этих событиях был примерно одним и тем же — меганадвигом.

Предполагается, что появление афтершоков со сбросовым типом фокального механизма на малых глубинах в пределах аккреционной призмы связано с деталями внутреннего строения призмы (с шириной ее фронтальной наиболее деформированной части, близостью к океаническому желобу жесткой и прочной тыльной части призмы, прочностью ее срединной части и пр.) и мощностью малопрочных терригенных осадков, затянутах в межплитное пространство в процессе субдукции литосферных плит. Эти детали, по-видимому, и определяют характер релаксации накопленных тектонических напряжений из широкой окрестности призмы в компактную область косейсмического скольжения с практически полной их разрядкой. Этим же отчасти можно объяснить столь продолжительную стадию афтершокового режима, сопровождающуюся столь ярким изменением кинематики типов фокальных механизмов в верхнем этаже земной коры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лукк А.А., Леонова В.Г. Вариации кинематики деформирования в окрестности катастрофического Суматранского землетрясения // Геофизически процессы и биосфера. 2018. Т. 17. № 4. С. 76–91. <https://doi.org/10.21455/GPB2018.4-5>

Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю. Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. // Геодинамика и Тек-

тонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 469–506. <https://doi.org/10.5800/GT2014520137>

Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука. 1990. 191 с.

Asano Y., Saito T., Ito Y., Shiomi K., Hirose H., Matsumoto T., Aoi Sh., Hori S., Sekiguchi S. Spatial distribution and focal mechanisms of aftershocks of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // Earth Planets Space. 2011. V. 63. P. 669–673. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.016>

Azuma R., Hino R., Ohta Y., Ito Y., Mochizuki K., Uehira K., Murai Y., Sato T., Takunami T., Shinohara M., Kanazawa T. Along-arc heterogeneity of the seismic structure around a large coseismic shallow slip area of the 2011 Tohoku-oki earthquake: 2-D Vp structural estimation through an air gun-ocean bottom seismometer experiment in the Japan Trench subduction zone // J. Geophysical Research: Solid Earth. 2018. V. 123. P. 5249–5264. <https://doi.org/10.1029/2017JB015361>

Banerjee P., Pollitz F., Nagarajan B., Burgmann R. Coseismic slip distribution of the 26 December 2004 Sumatra–Andaman and 28 March 2005 Nias earthquakes from GPS static offsets // Bull. Seismol. Soc. Am. 2007. V. 97. № 1. Part A. P. 86–102.

Bilek S.L., Lay T. Rigidity variations with depth along the interplate megathrust faults in subduction zones // Science. 1999. V. 400. P. 443–446.

Contreras-Reyes E., Flueh E.R., Grevemeyer I. Tectonic control on sediment accretion and subduction off south central Chile: Implication for coseismic rupture processes of the 1960 and 2010 megathrust earthquakes // Tectonics. 2010. V. 29. TC0618. <https://doi.org/10.1029/2010TC002734>

Cubas N., Avouac J.P., Leroy Y.M., A. Pons. Low friction along the high slip patch of the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki earthquake required from the wedge structure and extensional splay faults // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. P. 4231–4237. <https://doi.org/10.1002/grl.50682>

Dewey J.W., Choy G., Presgrave B., Sipkin S., Tarr A.C., Benz H., Earle P., Wald D. Seismicity associated with the Sumatra–Andaman Islands earthquake of 26 Decembre 2004 // Bull. Seismol. Soc. Am. 2007. V. 96. № 1A. P. 25–42.

Fujiwara T., Kodaira S., No T., Kaiho Y., Takahashi N., Kaneda Y. The 2011 Tohoku-oki earthquake: Displacement reaching the trench // Science. 2011. V. 334(6060). P. 1240. <https://doi.org/10.1126/science.1211554>

Geospatial Information Authority of Japan. The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Coseismic and postseismic slip distribution on the plate interface (preliminary result). <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110315.2-index-e.html>, 2011.

Hasegawa A., Yoshida K., Okada T. Nearly complete stress drop in the 2011 M_w 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // Earth Planets Space. 2011. V. 63. P. 703–707. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.007>

Ide S., Baltay A., G. C. Beroza. Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 M_w 9.0 Tohoku-oki earthquake // Science. 2011. V. 332. P. 1427–1429.

Inuma T., Hino R., Kido M., Inazu D., Osada Y., Ito Y. et al. Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake ($M9.0$) refined by means of seafloor

- geodetic data // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. B07409. <https://doi.org/10.1029/2012JB00918>
- International Seismological Centre, On-line Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>
- Ito A., Yamamoto Y., Hino R., Suetsugu D., Sugioka H., Nakano M., Obana K., Kazuo Nakahigashi K., Shinohara M.* Tomographic image of crust and upper mantle off the Boso Peninsula using data from an ocean-bottom seismograph array // *Earth Planets Space.* 2017. V. 69. P. 118. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0703-6>
- Katsumata K.* Precursory seismic quiescence before the $M_w = 8.3$ Tokachi-oki, Japan, earthquake on 26 September 2003 revealed by a re-examined earthquake catalog // *Journ. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. B10307. <https://doi.org/10.1029/2010jb007964>
- Kawamura M., Wu Y.-H., Kudo T., Chen Ch.* Precursory Migration of Anomalous Seismic Activity Revealed by the Pattern Informatics Method: A Case Study of the 2011 Tohoku Earthquake, Japan // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 2013. V. 103. № 2B. P. 1171–1180. <https://doi.org/10.1785/0120120094>
- Kido M., Osada Y., Fujimoto H., Hino R., Ito Y.* Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake // *Geoph. Res. Lett.* 2011. V. 38. L24303. <https://doi.org/10.1029/2011GL050057>
- Kumagai H., Pulido N., Fukuyama E., Aoi Sh.* Strong localized asperity of the 2011 Tohoku-Oki earthquake // *Earth Planets Space.* 2012. V. 64. P. 649–654. <https://doi.org/10.5047/eps.2012.01.004>
- Lay T., Ammon C.J.H., Kanamori L. Xue, Kim M.J.* Possible large near-trench slip during the 2011 Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // *Earth Planets Space.* 2011. V. 63. P. 687–692.
- Lay T., Kanamori H., Ammon Ch.J., Koper K.D., Hutko A.R., Ye L., Yue H., T. M. Rushing.* Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults // *J. Geoph. Res.* 2012. V. 117. P. B04311. <https://doi.org/10.1029/2011JB009133>
- Lin J.Y., Wu W.N.* Spatio-temporal distribution of seismic moment release near the source area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake // *Earth Planets Space.* 2012. V. 64. P. 1067–1075. <https://doi.org/10.5047/eps.2012.04.006>
- Nakahigashi K., Shinohara M., Mochizuki K., Yamada T., Hino R., Sato T., Uehira K., Ito Y., Murai Y., Kanazawa T.* P-wave velocity structure in the southernmost source region of the 2011 Tohoku earthquakes, off the Boso Peninsula, deduced by an ocean bottom seismographic survey // *Earth Planets Space.* 2012. V. 64. P. 1149–1156. <https://doi.org/10.5047/eps.2012.06.006>
- Nakamura W., Uchida N., Matsuzawa T.* Spatial distribution of the faulting types of small earthquakes around the 2011 Tohokuoki earthquake: A comprehensive search using template events // *J. Geoph. Res. Solid Earth.* 2016. V. 121. P. 2591–2607. <https://doi.org/10.1002/2015JB012584>
- Obana K., Fujie G., Takahashi T., Yamamoto Y., Nakamura Y., Kodaira S., Takahashi N., Kaneda Y., Shinohara M.* Normal-faulting earthquakes beneath the outer slope of the Japan Trench after the 2011 Tohoku earthquake: Implications for the stress regime in the incoming Pacific plate // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. L00G24. <https://doi.org/10.1029/2011GL050399>
- Okada Y., Kasahara K., Hori S., Obara K., Sekiguchi S., Fujiwara H., Yamamoto A.* Recent progress of seismic observation networks in Japan—Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net // *Earth Planets Space.* 2004. V. 56. P. XV–XXVIII.
- Ozawa S., Nishimura T., Munekane H., Suito H., Kobayashi T., Tobita M., Imakiire T.* Preceding, coseismic and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake, Japan // *J. Geoph. Res.* 2012. V. 117. B07404. <https://doi.org/10.1029/2011JB009120>
- Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu., Zlobin T.K.* The state of stress in the Earth's crust along the northwestern flank of the Pacific seismic focal zone before the Tohoku earthquake of 11 March 2011 // *Tectonophysics.* 2016. V. 685. P. 60–76. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.07.016>
- Satake K., Fujii Y., Harada T., Y. Namegaya.* Time and slip distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2013. V. 102(2B). P. 1473–1492. <https://doi.org/10.1785/0120120122>
- Sato M., Ishikawa T., Ujihara N., Yoshida S., Fujita M., Mochizuki M., Asada, A.* Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-oki earthquake // *Science.* 2011. V. 322. P. 1395. <https://doi.org/10.10126/science.1207401>
- Shinohara M., Machida Y., Yamada T., Nakahigashi K., Shinbo T., Mochizuki K., Murai Y., Hino R., Ito Y., Sato T., Shiobara H., Uehira K., Yakiwara H., Obana K., Takahashi N., Kodaira Sh., Hirata K., Tsushima H., Iwasaki T.* Precise aftershock distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake revealed by an ocean-bottom seismometer network // *Earth Planets Space.* 2012. V. 64. P. 1137–1148. <https://doi.org/10.5047/eps.2012.09.003>
- Scholz C.H.* The mechanics of earthquakes and faulting (2nd ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2002. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511818516>
- Sun T., Wang K., Fujiwara T., Kodaira Sh., He J.* Large fault slip peaking at trench in the 2011 Tohoku-oki earthquake // *Nature Communications.* 2017. V. 8. P. 14044. <https://doi.org/10.1038/ncomms14044>
- Tajima F., Mori J., Kennett B.L.N.* A review of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0): Large-scale rupture across heterogeneous plate coupling // *Tectonophysics.* 2013. V. 586. P. 15–34. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.09.014>
- Tsuji T., Ito Y., Kido M., Osada Y., Fujimoto H., Ashi J., Kinoshita M., T. Matsuoka* Potential tsunamigenic faults of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // *Earth Planets Space.* 2011. V. 63. P. 831–834.
- Tsuru T., Park J., Takahashi N., Kodaira Sh., Kido Y., Kaneda Y., Kono Y.* Tectonic features of Japan Trench convergent margin off Sanriku, northeastern Japan, revealed by multi-channel seismic reflection data // *J. Geoph. Res.* 2000. V. 105(B7). P. 16.403–16.413. <https://doi.org/10.1029/2000JB900132>
- Tsuru T., Park J., Miura S., Kodaira S., Kido Y., Hayashi T.* Along-arc structural variation of the plate boundary at the Japan Trench margin: Implication of interplate coupling // *J. Geoph. Res.* 2002. V. 107(B12). P. 2357. <https://doi.org/10.1029/2001JB001664>

- Tsushima H., Hirata K., Hayashi Y., Tanioka Y., Kimura K., Sakai S. et al.* Near-field tsunami forecasting using offshore tsunami data from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake // *Earth Planets Space*. 2011. V. 63. № 7. P. 821–826.
<https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.052>
- Uchida N., Matsuzawa T.* Coupling coefficient, hierarchical structure, and earthquake cycle for the source area of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake inferred from small repeating earthquake data // *Earth Planets Space*. 2011. V. 63. P. 675–679.
- Ujii K., Tanaka H., Saito T., Tsutsumi A., Mori J.J., Kameda J. et al.* Low coseismic shear stress on the Tohoku-oki megathrust determined from laboratory experiments // *Science*. 2013. V. 342. P. 1222–1214.
<https://doi.org/10.1126/science.1243485>
- Wang L., Shum C.K., Simons F.J., Tapley B., Dai Ch.* Coseismic and postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake constrained by GRACE gravimetry // *Geoph. Res. Lett.* 2012. V. 39. P. L07301.
<https://doi.org/10.1029/2012GL051104>
- Wang K., Sun T., Brown L., Hino R., Tomita F., Kido M., Iinuma T., Kodaira Sh., Fujiwara T.* Learning from crustal deformation associated with the M9 2011 Tohoku-oki earthquake // *Geosphere*. 2018. V. 14. № 2. P. 552–571.
<https://doi.org/10.1130/GESO1531.1>
- Yamamoto Y., Obana K., Kodaira S., Hino R., Shinohara M.* Structural heterogeneities around the megathrust zone of the 2011 Tohoku earthquake from tomographic inversion of onshore and offshore seismic observations // *J. Geoph. Res. Solid Earth*. 2014. V. 119. P. 1165–1180.
<https://doi.org/10.1002/2013JB010582>
- Zhao D., Huang Z., Umino N., Hasegawa A., Kanamori H.* Structural heterogeneity in the megathrust zone and mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (M_w 9.0) // *Geoph. Res. Lett.* 2011. V. 38. P. L17308.
<https://doi.org/10.1029/2011GL048408>

Statistics of the Focal Mechanisms in the Space-Time Vicinity of the 2011 Tohoku Catastrophic Earthquake, Japan

A. A. Lukk^a, * and V. G. Leonova^a

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

**e-mail: Lukk@ifz.ru*

Received October 29, 2018; revised March 21, 2019; accepted March 25, 2019

Statistical analysis of the focal mechanisms of the earthquakes based on the ISC standard catalog from 2001 to 2017 is carried out in the spatiotemporal vicinity of the epicentral zone of the catastrophic seismic event of 2011 with $M_w = 9.0$ in Tohoku (Japan). It is established that during the 10-year period preceding this earthquake, more than 80% of the intermediate (B) axes of the focal mechanisms of earthquakes in the depth interval from 0 to 65 km have a dip of at most 20° and are mainly oriented in the azimuthal sector from 190° to 210° enclosing the strike of the Japan Oceanic Trench. More than 75% of the pressure axes (P) are inclined to the horizon at 5° – 35° , and more than 75° of the axes of tension (T) have a dip of 50° to 80° . This orientation of the principal axes of the focal mechanisms unambiguously indicates the predominance of thrusting or underthrusting at these depths. This corresponds to the well-known tectonic assumption that the Pacific Ocean lithospheric plate subducts beneath the continental Okhotsk plate in the region of the Islands of Japan in the approximately sublatitudinal direction. The mega-thrust slip in the source of the catastrophic Tohoku earthquake also corresponds to this type of the focal mechanism. This type of the focal mechanism was also observed for the aftershock sequence of the earthquakes located in the vicinity of the surface separating the hanging and subducting edges of the lithospheric plates colliding here—at the location of the catastrophic earthquake. The predominant depth range of these earthquakes is 30 to 55 km. At the same time, it is established that the aftershock sequence of this event at shallow depths (less than 20 km) within the coastal accretionary prism has a striking feature in the form of the earthquakes having a normal-fault mechanism untypical of the subduction zones. These earthquakes make up about 70% of the total number of the aftershocks. It is hypothesized that the existence of the aftershocks with a normal-fault type of focal mechanism at shallow depths within the accretionary prism is associated with the details of the internal structure of the prism and with the thickness of the weak terrigenous sediments sucked into the interplate space by the subduction of the lithospheric plates. These details determine the observed pattern of the relaxation of the accumulated tectonic stresses from a wide vicinity of the prism into the compact region of their almost complete release during the intense coseismic slip.

Keywords: focal mechanisms, thrusting/underthrusting, mega-thrust slip, normal fault type of a focal mechanism