

УДК 550.34:551.21

ТОЛУДСКАЯ ВСПЫШКА СЕЙСМИЧНОСТИ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 30.11.2012 г. ($M_C = 5.4$, $M_W = 4.8$), СОПРОВОЖДАВШИЕ НАЧАЛО ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ 2012–2013 гг.

© 2017 г. Ю. А. Кугаенко*, В. М. Павлов, Е. И. Иванова,
И. Р. Абубакиров, В. А. Салтыков

*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
“Единая геофизическая служба Российской академии наук”*

683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9

**e-mail: ku@emsd.ru*

Поступила в редакцию 12.05.2016 г.

Представлены результаты исследования Толудской серии землетрясений – вспышки малоглубинной сейсмичности 28.11–7.12.2012 г., сопровождавшей начальную фазу Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. Наиболее сильное землетрясение – Толудское землетрясение 30.11.2012 г. с $K_S = 11.3$, $M_L = 4.9$, $M_C = 5.4$, $M_W = 4.8$ – входит в число пяти сильнейших сейсмических событий, зарегистрированных на глубине до 10 км под всей Ключевской группой вулканов в 1961–2015 гг. Установлено, что Толудская серия сейсмических событий является форшок-афтершоковым процессом Толудского землетрясения. Это одна из сильнейших сейсмических активизаций в вулканических районах Камчатки. Для Толудского землетрясения и его сильнейшего афтершока с $M_L = 4.3$ по данным камчатских сейсмических станций были рассчитаны параметры и механизмы очагов и моментные магнитуды, информация по которым отсутствует в мировых центрах сейсмологических данных. Механизмы очагов Толудского землетрясения и его афтершока соответствуют сейсмической проработке разлома растяжения в зоне рифта. По инструментальным данным оценена интенсивность сотрясений, вызванных Толудским землетрясением. Рассмотрена последовательность событий, отражающая динамику сейсмической и вулканической активности Толбачинской зоны в конце ноября 2012 г. и завершившаяся Толудской вспышкой сейсмичности. Исходя из имеющихся представлений о тектонике и магматических источниках Толбачинской вулканической зоны, обсуждаются возможные причины этих землетрясений.

DOI: 10.7868/S0203030617060049

ВВЕДЕНИЕ

В статье рассматривается серия мелкофокусных землетрясений, зарегистрированная 28.11–7.12.2012 г. в юго-западном секторе Ключевской группы вулканов (КГВ) и по времени совпадающая с начальной фазой (первыми днями) Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. (ТТИ) [Гордеев и др., 2013; Belousov et al., 2015; и др.]. Эпицентры концентрировались в районе реки Толуд, поэтому обсуждаемую последовательность сейсмических событий мы будем называть Толудским облаком или Толудской серией землетрясений (рис. 1). 30.11.2012 г. на глубине ~6 км произошло землетрясение с магнитудой $M_L = 4.9$ (далее – Толудское землетрясение (ТЗ), рис. 2, табл. 1). Последовавшая за ТЗ локальная сейсмическая активизация в основном закончилась 6–7 декабря 2012 г. При этом энергия Толудского облака землетрясений в ~50 раз превысила сейсмическую энергию, выделившуюся в 2012 г. в районе вулкана Плоский Толбачик как при подготовке, так и непосредственно в ходе

ТТИ. Внезапность, короткая длительность и высокая интенсивность этого сейсмического эпизода позволяет говорить о нем как о вспышке сейсмичности.

Сейсмичность района долины реки Толуд уже не в первый раз привлекает внимание ученых. Впервые Толудская эпицентрально-зона¹ стала упоминаться в ходе исследований Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. (БТТИ), и ее сейсмическая активность связывалась с оттоком базальтов на малых глубинах из-под вулкана Плоский Толбачик в ходе извержения [Большое..., 1984]. Однако ранее такие сильные землетрясения, как ТЗ, в Толудской эпицентральной зоне не происходили.

ТЗ входит в число пяти сильнейших сейсмических событий, зарегистрированных на глубине до 10 км под всей КГВ за годы детальных сейсмологических

¹ В работе [Большое..., 1984] под Толудской эпицентральной зоной подразумевалась значительно более обширная территория.

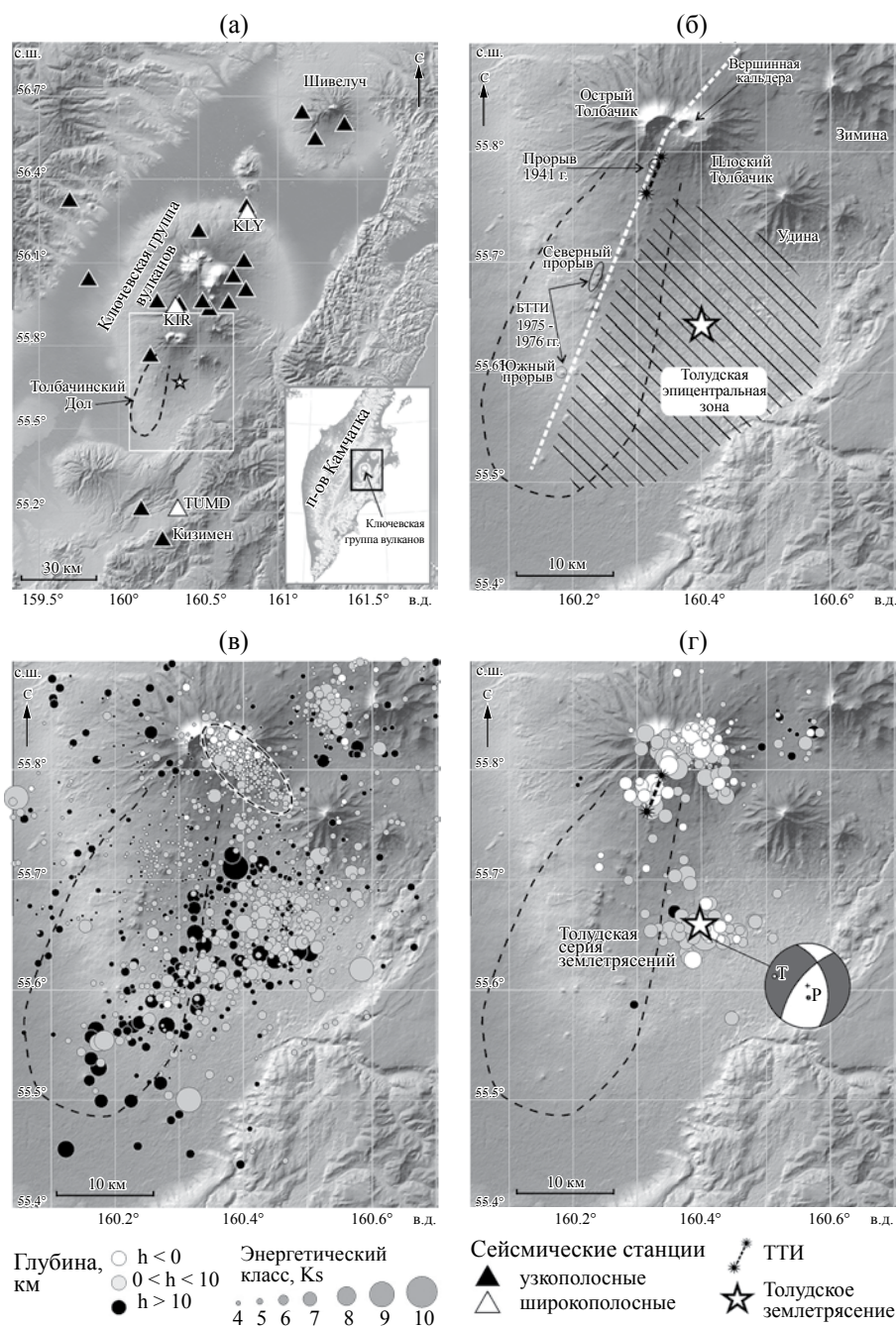


Рис. 1. Схематическая карта района Толудской серии землетрясений и ТТИ.

а – эпицентр Толудского землетрясения (звезда) на схеме сейсмических станций, расположенных в районе Ключевской группы вулканов; прямоугольником выделен фрагмент карты, представленный более подробно на рис. 1б, 1в, 1г; б – схема района БТТИ и ТТИ; светлый пунктир – осевая линия зоны глубинного магноподводящего разлома (рифта); штриховкой выделена Толудская эпицентральная зона; в – эпицентры землетрясений Толбачинской вулканической зоны с 01.01.1999 г. по 26.11.2012 г., до начала ТТИ; эллипсом околонулена область сейсмической активизации, предвалявшей ТТИ в августе–ноябре 2012 г.; г – сейсмичность, сопровождавшая первые недели ТТИ, с 27.11.2012 г. по 01.01.2013 г.; выделен эпицентр Толудского землетрясения (звезда) и представлен механизм его очага в стереографической проекции нижней полусферы, рассчитанный по широкополосным сейсмическим записям (Т – ось растяжения, Р – ось сжатия). Черным пунктиром очерчена условная граница Толбачинского Дола.

наблюдений (1961–2015 гг.). Такими были землетрясения, предвалявшие в 1975 г. Северный прорыв БТТИ [Большое..., 1984]. ТЗ вывело уровень

сейсмической активности Толудской эпицентральной зоны на *экстремально высокий* уровень по шкале СОУС'09 [Салтыков, 2011] во временных

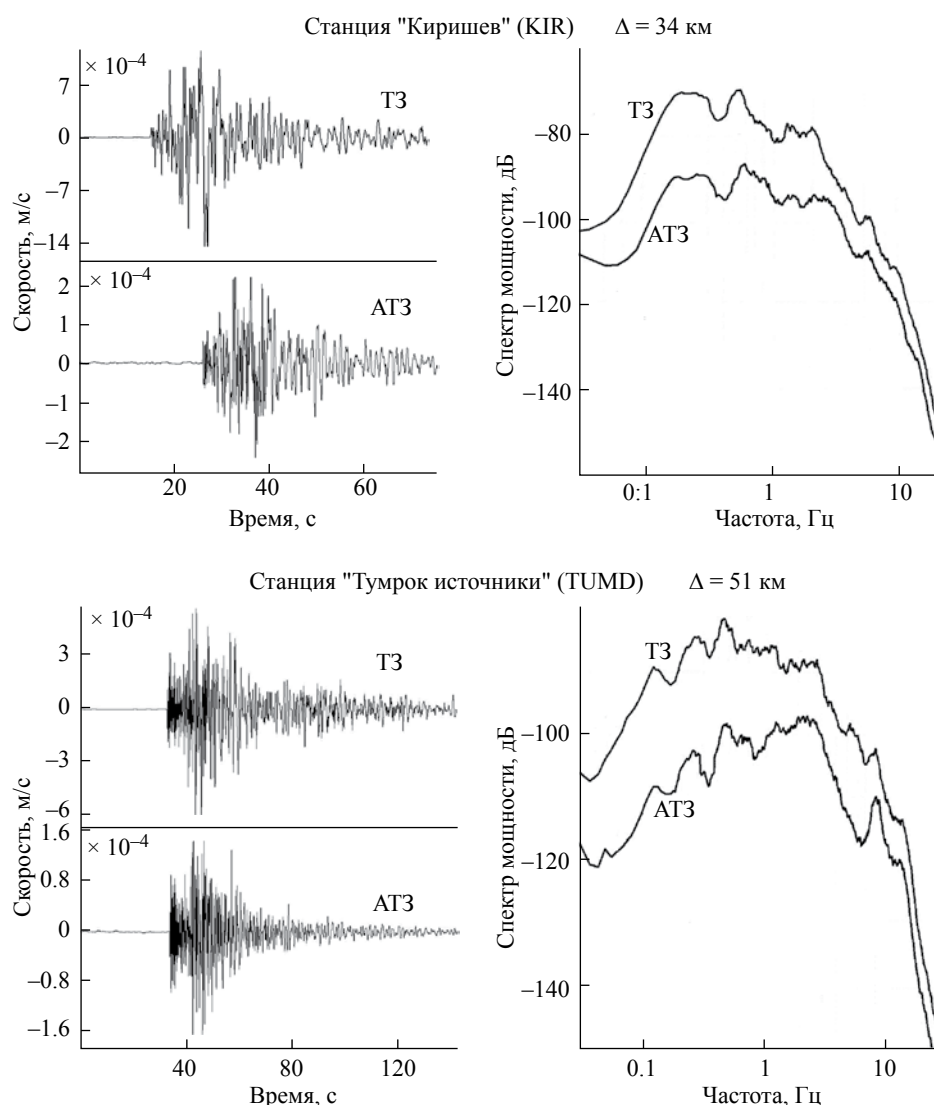


Рис. 2. Примеры записей Толудского землетрясения (ТЗ) и его сильнейшего афтершока (АТЗ) широкополосными сейсмическими станциями и их спектры (вертикальный канал).

Таблица 1. Параметры Толудского землетрясения (ТЗ) и его сильнейшего афтершока (АТЗ)

Базовые параметры землетрясений по каталогу КФ ФИЦ ЕГС РАН							
Событие	Дата и время ¹		Положение гипоцентра ²			K^3	$M_L / M_C / m_b^4$
	д.м.г.	ч : м : с	ϕ (°), λ (°), h (км)				
ТЗ	30.11.2012	11:00:31.3	55.66	160.41	6 ± 6	11.3	4.9 / 5.4 / 4.8
АТЗ	30.11.2012	12:49:33.1	55.65	160.42	5 ± 6	10.0	4.3 / 4.6 / 4.2
Параметры очагов землетрясений, определенные по широкополосным сейсмограммам							
Событие	M_0 , 10^{15} Нм	M_w	H , км	S , км ²	D , км	τ , с	σ , %
ТЗ	19.1	4.8	5	5.0	2.6	2	28
АТЗ	2.9	4.2	5	1.3	1.2	0	44

Примечание. ¹ Точность определения времени в очаге составляет 0.3 с для обоих событий; ² точность определения эпицентра составляет 6 км для обоих событий; ³ в статье используется $K = K_s$ по энергетической классификации С.А. Федотова [Федотов, 1972]; ⁴ магнитуда m_b определена в ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск (<http://www.gsras.ru>). M_0 – скалярный сейсмический момент; M_w – моментная магнитуда; S – площадь разрыва; H – глубина эквивалентного точечного источника; D – линейные размеры разрыва; τ – длительность разрыва; приведенные значения условны, так как в алгоритме значения меняются с шагом 2 с, в то же время при малых значениях τ слабые события нечувствительны к этому параметру (для афтершока – источник мгновенный); σ – остаточная невязка (сумма квадратов отклонений отсчетов синтетических и наблюдаемых сейсмограмм, нормированная на сумму квадратов отсчетов наблюдаемых сейсмограмм).

окнах более 11 суток [Салтыков и др., 2012; Кугаенко и др., 2015].

Для ТЗ и его сильнейшего афтершока с $M_L = 4.3$ (АТЗ) по данным камчатских сейсмических станций были рассчитаны параметры (скалярный сейсмический момент, глубина эквивалентного точечного источника и размер площадки разрыва), определены механизмы очагов и их моментные магнитуды. Механизмы этих событий были определены двумя методами: по поляризациям первых вступлений объемных волн и по полным волновым формам сейсмограмм смещений. Второй метод позволяет определять и моментную магнитуду. Информация по этим параметрам для Толудских землетрясений отсутствует в мировых центрах сейсмологических данных.

В работе использованы каталоги и сейсмические записи, получаемые в Камчатском филиале Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук” (КФ ФИЦ ЕГС РАН).

ТОЛУДСКАЯ СЕРИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАК ОДНА ИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ АКТИВИЗАЦИЙ В ВУЛКАНИЧЕСКИХ РАЙОНАХ КАМЧАТКИ

Сопоставим Толудскую серию землетрясений с сильнейшими сейсмическими активизациями в вулканических районах Камчатки. Мелкофокусные землетрясения, происходящие на расстоянии 10–15 км от активных вулканов, проявляющих сейсмическую активность, относятся к вулканотектоническим землетрясениям [Токарев, 1981; Горельчик и др., 1987; Гордеев и др., 2006; и др.]. Считается, что такие сейсмические события могут отражать процессы, связанные с внедрением и перемещением вулканических расплавов. Сейсмичность, приуроченная к активным вулканам, проявляется на Камчатке в основном в виде роевых последовательностей, то есть отмечается отсутствие основного события, существенно превышающего по энергии другие землетрясения, а скорость сейсмического потока в рое остается практически постоянной. В вулканических районах Камчатки за весь период детальных сейсмологических наблюдений (1961–2015 гг.) было зарегистрировано лишь семь вулканотектонических последовательностей, сильнейшие землетрясения которых имели $K_{\max} > 11.0$ (здесь и далее используется энергетический класс $K = K_S$ по [Федотов, 1972]):

– рой 02–11.11.1964 г. ($K_{\max} = 12.3$, $M = 5.5$), предварявший катастрофическое извержение

вулкана Шивелуч 12.11.1964 г. [Токарев, 1967; Гордеев и др., 1998];

– рой 27.06–05.07.1975 г. ($K_{\max} = 11.3$, $M_{LH} = 5$), предварявший Северный прорыв БТТИ [Большое..., 1984];

– Карымский рой 25.01–23.02.1978 г. ($K_{\max} = 12.7$, $M = 5.4$) произошел во время активной фазы извержения Карымского вулкана 1976–1982 гг. [Зобин и др., 1983; Токарев, 1989; Гордеев и др., 1998];

– Асачинский рой землетрясений 07.03–08.04.1983 г. ($K_{\max} = 11.8$, $M = 4.6$) под недействующим вулканом Асача – эта роевая последовательность завершилась без вулканической активизации [Токарев, 1984];

– произошедшие 01.01–20.02.1996 г. сейсмические события Карымского сейсмо-вулканического кризиса [Федотов, 1997], зачастую называемые роем, но, как показал анализ этой сейсмической активизации [Гордеев и др., 1998], являющиеся форшок-афтершоковым процессом Карымского землетрясения 01.01.1996 г. – сильнейшего корового землетрясения ($K_S = 14.3$, $M_S = 7.0$, $M_W = 6.3$), зафиксированного под материковой частью Камчатки за годы детальных сейсмологических наблюдений [Левина и др., 2002; Павлов, 2010];

– рой 2009–2010 гг. ($K_{\max} = 11.9$, $M_C = 5.3$), предварявший извержение вулкана Кизимен 2010–2013 гг. [Сенюков и др., 2011];

– Толудская серия землетрясений 28.11–7.12.2012 г., включая ТЗ 30.11.2012 г. с $K_S = 11.3$, $M_L = 4.9$, $M_C = 5.4$, которая рассматривается в данной статье.

При этом один из сильнейших камчатских малоглубинных роев – Шапинский рой землетрясений 1963 г. ($K_{\max} = 11.9$, $M = 6.0$), протянувшийся от грабена реки Шапина и вулкана Кизимен к северной части Кроноцкого полуострова [Гордеев и др., 1991, 1998], относится к одной из наиболее выраженных зон коровых тектонических землетрясений Камчатки, не связывается с деятельностью вулкана Кизимен и рассматривается как результат локальной тектонической активности.

Таким образом, приведенный перечень сильнейших групп вулканотектонических землетрясений позволяет поставить Толудские землетрясения 28.11–7.12.2012 г. в ряд сильнейших активизаций, инструментально зафиксированных в вулканических районах Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений (1961–2015 гг.). Из них лишь Асачинский рой 1983 г. и Толудская серия землетрясений не закончились извержением.

АФТЕРШОКИ ТОЛУДСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Пространственно Толудское облако землетрясений не связано ни с предварявшей извержение сейсмической активизацией (см. рис. 1в), ни с областью землетрясений эруптивной зоны (см. рис. 1г). Оно тяготеет к восточному краю протяженного рифта ССВ простирания, проходящего

через вершину вулкана Плоский Толбачик и зону моногенных вулканов Толбачинского Дола и питающего эруптивные центры голоценовых извержений (см. рис. 1б). Эпицентры Толудского облака землетрясений образуют компактную группу размером $\sim 5 \times 10$ км, вытянутую субширотно (рис. 3), в 20 км к югу от вулкана Плоский Толбачик (см. рис. 1г). С 28.11.2012 г. по 7.12.2012 г. было

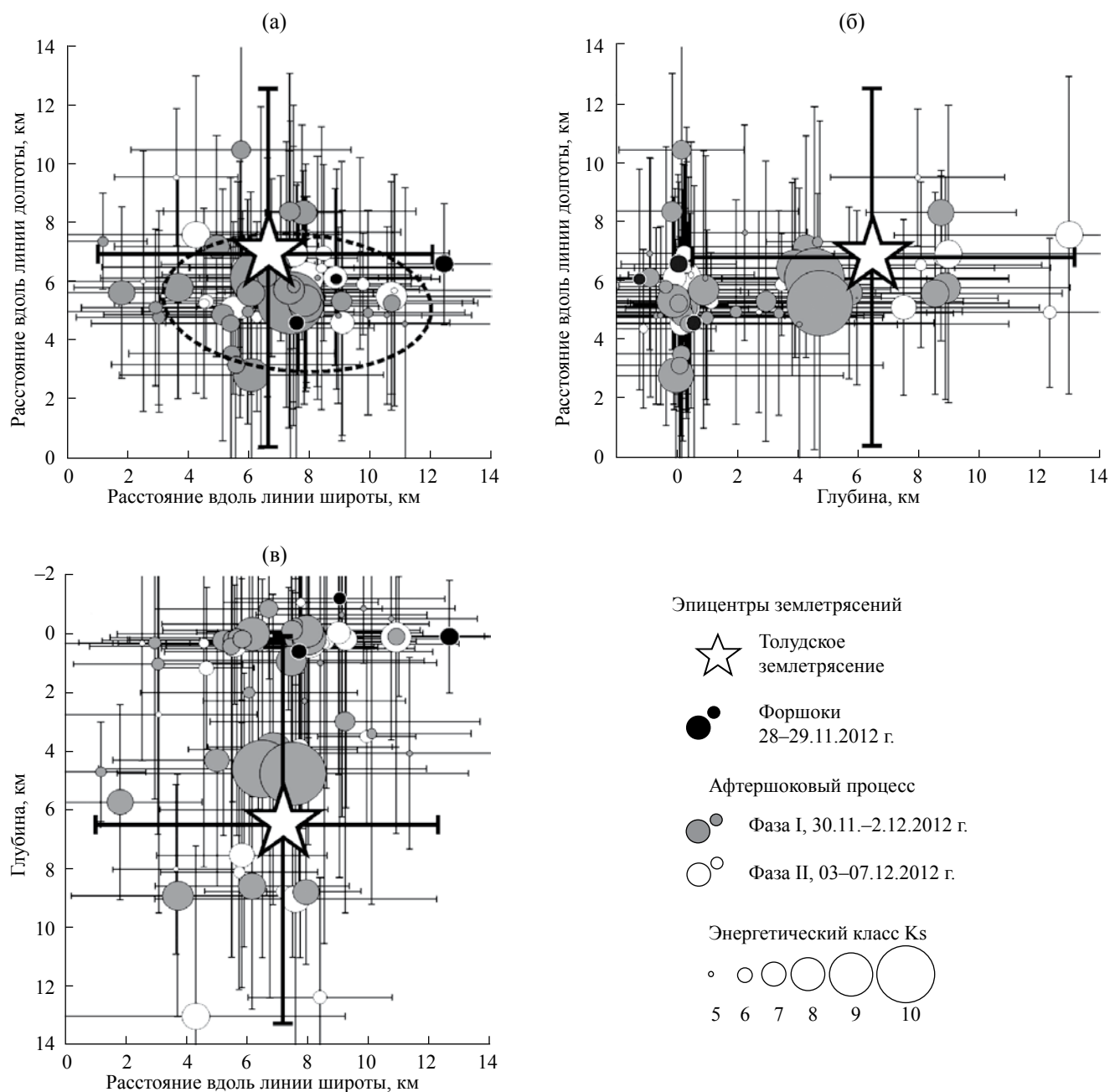


Рис. 3. Форшоки и афтершоки Толудского землетрясения.

Карта эпицентров (а) и вертикальные разрезы (б – субширотный, в – субмеридиональный). Эллипс оконтуривает 90% эпицентров. Цветовое разбиение отражает основные описанные в тексте фазы развития форшок-афтершокового процесса. Интервалы соответствуют невязкам определения координат землетрясений (интервалы для ТЗ выделены более жирной линией).

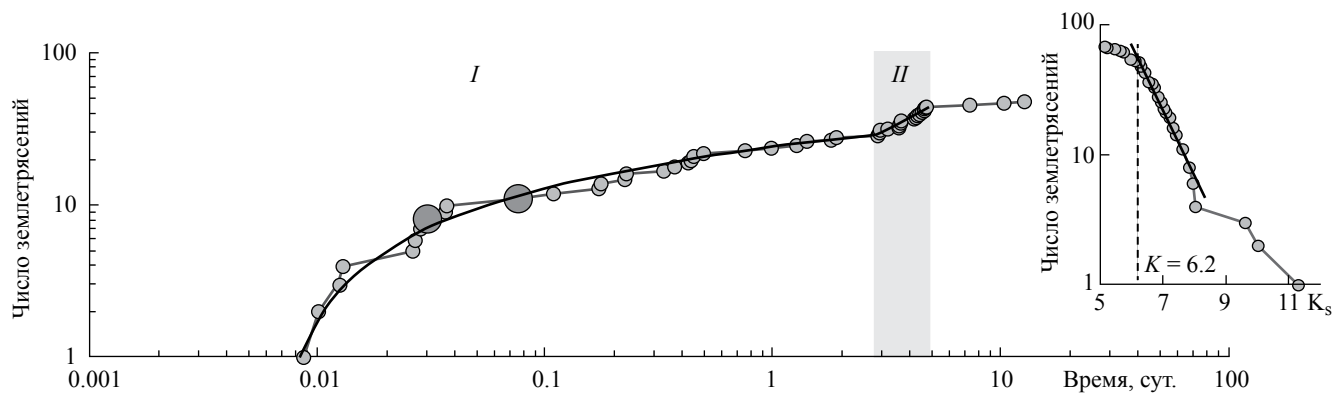


Рис. 4. Характерные фазы развития афтершокового процесса Толудского землетрясения.

За начало отсчета взято время основного события. Отмечены временные границы выделенных фаз: афтершоковой последовательности (I) и роя (II). На графике выделены два сильнейших афтершока. На врезке представлен кумулятивный график повторяемости для Толудского облака землетрясений.

локализовано около 70 сейсмических событий с $K_S = 5.2–11.3$, при этом выделилась суммарная сейсмическая энергия $\Sigma E \sim 2.1 \cdot 10^{11}$ Дж. Глубина землетрясений в основном не превышает 10 км. Основное число афтершоков расположено выше основного события. Невязки определения координат Толудских землетрясений составляют для эпицентров 4 км со среднеквадратичным отклонением $\sigma = 1$ км, для глубины 5 км с $\sigma = 2$ км (погрешность соответствует среднеквадратичному отклонению).

По графику повторяемости для Толудского облака землетрясений (рис. 4) уровень представительной регистрации (в условиях интенсивного вулканического дрожания на начальной стадии ТТИ) определен как $K_S = 6.2$.

Динамика афтершокового процесса во времени является характерным проявлением эмпирического закона Омори, согласно которому активность афтершоковой последовательности угасает со временем по степенному закону $\frac{dN}{dt} \sim \frac{1}{t^p}$, где N – число афтершоков, t – время, p – параметр Омори.

Анализ Толудского облака показал, что после ТЗ в течение ~ 3 суток наблюдалась афтершоковая последовательность землетрясений (см. рис. 4), интенсивность которой убывала по гиперболическому закону (закону Омори с параметром $p = 1$). Причем два наиболее сильных афтершока с $K_S = 9.6$ и $K_S = 10.0$ произошли 30.11.2012 г. в течение первых двух часов после основного события. Эта фаза сменилась эпизодом более слабой сейсмичности (с 03.12.2012 г. 7:30 по 05.12.2012 г. 3:09, $K_S = 5.7–7.9$), который имел характер роя с практически постоянной скоростью сейсмического потока, после чего сейсмическая активность Толудского облака угасла. Три землетрясения, зафиксированных 28–29.11.2012 г., перед ТЗ, вероятно, следует рассматривать как его форшоки ($K_S = 6.4–6.8$).

Примеры сейсмических записей ТЗ и его сильнейшего афтершока (АТЗ, $K_S = 10.0$, $M_L = 4.3$, $M_C = 4.6$) приведены на рис. 2, а их базовые параметры – в таблице 1. Оба события имеют четкие вступления продольных и поперечных волн, что соответствует характеру записи тектонического землетрясения.

Таким образом, Толудское облако не является *роем* землетрясений в контексте определения этого явления. В целом эта группа сейсмических событий может рассматриваться как предварявшееся единичными форшоками сильное землетрясение, его затухающий афтершоковый процесс и фаза роевого характера, в основном завершившая эту вспышку сейсмичности.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА

В мировых центрах сейсмологических данных параметры очагов ТЗ и АТЗ отсутствуют. Они были определены в КФ ФИЦ ЕГС РАН по записям камчатских сейсмических станций с привлечением данных мировой сети. Характеристики камчатской системы сейсмического мониторинга приведены в работах [Чебров и др., 2013; Сильные..., 2014], а сейсмические станции, контролирующие КГВ, представлены на рис. 1а.

Механизмы очагов ТЗ и АТЗ построены двумя способами: по знакам первых вступлений объемных волн [Введенская, 1969] с помощью программы А.В. Ландера FA2011² и по широкополосным цифровым сейсмограммам

² Ландер А.В. Комплекс программ определения механизмов очагов землетрясений и их графического представления // Отчет Камчатской опытно-методической сейсмологической партии Геофизической службы РАН “Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов в 2003 г.”. Фонды КФ ФИЦ ЕГС РАН. С. 359–380.

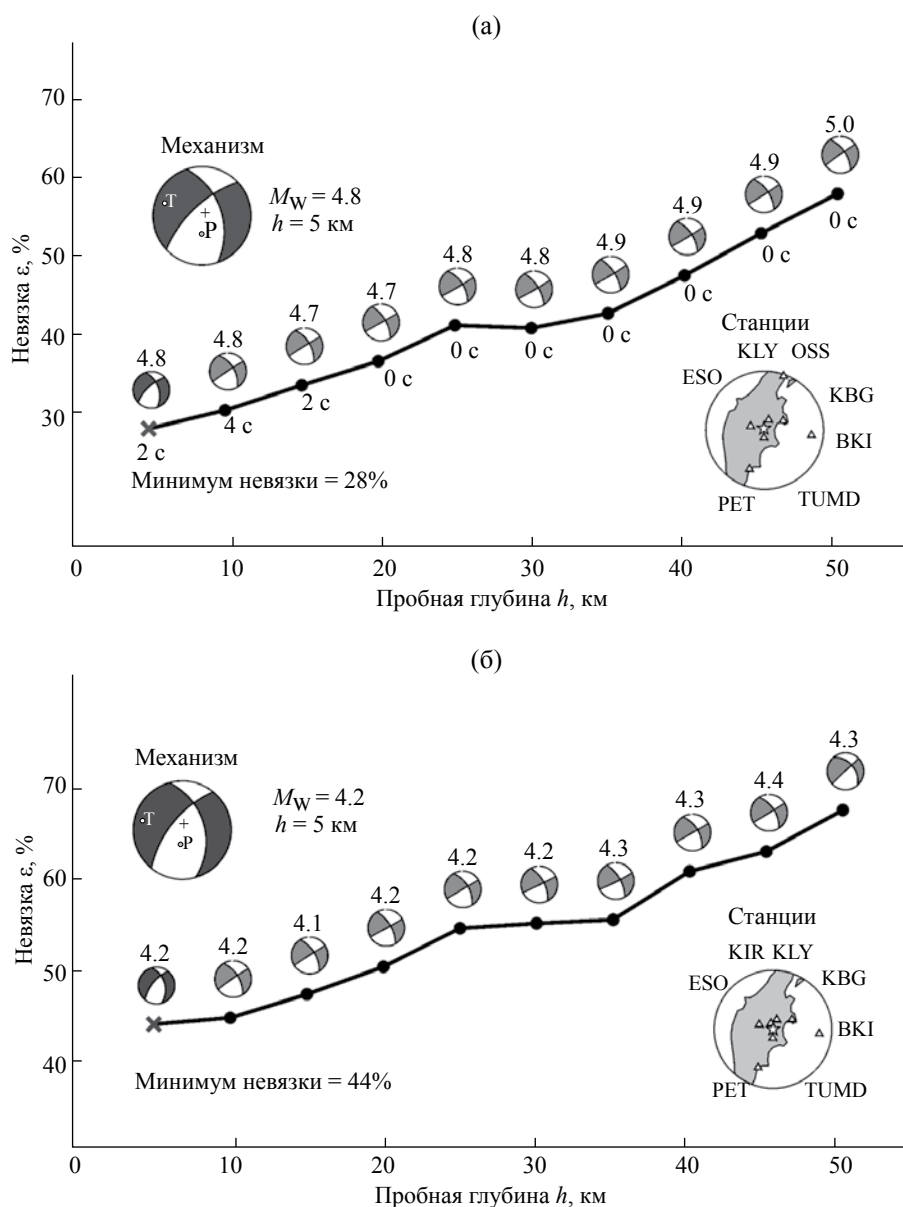


Рис. 5. Результаты расчета TCM типа “двойной диполь без момента” для Толудского землетрясения (а) и его сильнейшего афтершока (б).

Показана зависимость остаточной невязки ε от пробной глубины (с шагом 5 км), где остаточная невязка есть сумма квадратов разностей между отсчетами синтетических и наблюдаемых сейсмограмм, нормированная на сумму квадратов отсчетов наблюдаемых сейсмограмм. Для каждой пробной глубины приведены соответствующий механизм, значение моментной магнитуды и длительность разрыва в очаге τ (для афтершока — источник мгновенный, $\tau = 0$; шаг по τ равен 2 с). На обоих рисунках в левом верхнем углу приведен оптимальный механизм, в правом нижнем углу — положение использованных широкополосных станций (треугольники), окружающих эпицентр (звезда). Механизмы даны в равноплощадной проекции нижней полусферы.

путем расчета тензора сейсмического момента [Павлов, Абубакиров, 2012]. Отметим, что механизм, рассчитанный по знакам, несет информацию только о начальной стадии разрыва в очаге, в то время как механизм, определенный по длиннопериодным волновым формам, относится к очагу в целом. Оба землетрясения имеют довольно четкие P -вступления (см. рис. 2).

Благодаря этому в первом случае в качестве исходных данных удалось использовать знаки смещений первых вступлений P -волн на 37 камчатских региональных станциях и на 14 станциях мировых сетей в диапазоне эпицентральных расстояний Δ до ~ 8000 км. Во втором случае дополнительно оценивались глубина эквивалентного точечного источника, его длительность τ ,

моментная магнитуда M_w и размер площадки разрыва (см. табл. 1).



Процедура оценки механизма по волновым формам описана в работе [Павлов, Абубакиров, 2012]. Собственно механизм — пара нодальных плоскостей для P -волн, имеющих согласованную ориентацию (направление нормами) — находится по тензору сейсмического момента (ТСМ). Компоненты ТСМ определяются посредством минимизации нормированной функции невязки между наблюдаемыми и синтетическими волновыми формами смещений. По найденным компонентам ТСМ рассчитываются его главные значения и главные векторы, по которым определяются нодальные плоскости очага и значение скалярного сейсмического момента M_0 . Последнее определяет величину моментной магнитуды $M_w = 2/3 \cdot (\lg(M_0[\text{Н} \cdot \text{м}]) - 9.1)$ [Hanks, Kanamori, 1979].

Предварительно по записям приборов восстанавливались “истинные” смещения. Для расчета синтетических сейсмограмм использовался модифицированный вариант глобальной модели Земли AK135 [Kennett et al., 1995]. Как наблюдаемые, так и синтетические волновые формы фильтровались в полосе периодов 16–25 с. Полоса

фильтрации выбрана так, чтобы записи “истинных” смещений доминировали над шумом. При расчетах предполагалось, что ТСМ принадлежит к типу “двойной диполь без момента”. Временная функция источника для ТЗ — симметричный треугольник, для АТЗ — дельта-функция (мгновенный импульс). Для обоих событий оптимальный механизм соответствует глубине 5 км. Результаты расчета механизма для основного толчка и его афтершока приведены на рис. 5 и в таблице 2. На рис. 6 приведены волновые формы наблюдаемых смещений и смещений, рассчитанных с использованием оптимальных ТСМ.

На основе значения моментной магнитуды получим оценки протяженности очагов Толудских землетрясений. Сначала оценим площадь разрыва на основе корреляционной зависимости $\lg(S[\text{км}^2]) = M_w - 4.1$ в соответствии с работой [Гусев, Мельникова, 1990]. Если площадка разрыва — круг радиуса R , то $R = (S/\pi)^{1/2}$. Тогда для основного толчка с магнитудой $M_w = 4.8$ получим значение радиуса $R = 1.3$ км; для афтершока с магнитудой $M_w = 4.2$ — радиус $R = 0.6$ км. Таким образом, в предположении круговой площадки разрыва размеры очагов ТЗ и АТЗ можно оценить как $D = 2R = 2.6$ км и $D = 1.2$ км, соответственно.

Таблица 2. Механизмы очагов Толудского землетрясения и его сильнейшего афтершока

Использованные данные	Главные оси ¹						Механизм очага ²						Диаграмма механизма ³
	<i>T</i>		<i>N</i>		<i>P</i>		<i>NP1</i> (°)			<i>NP2</i> (°)			
	<i>pl</i>	<i>azm</i>	<i>pl</i>	<i>azm</i>	<i>pl</i>	<i>azm</i>	<i>stk</i>	<i>dip</i>	<i>slip</i>	<i>stk</i>	<i>dip</i>	<i>slip</i>	
Толудское землетрясение													
Широкополос- ные сейсмо- граммы	11	289	37	27	50	185	342	47	−146	227	66	−49	
Знаки первых вступлений Р-волн	0	286	28	16	62	196	351	51	−126	221	51	−53	
Сильнейший афтершок Толудского землетрясения													
Широкополос- ные сейсмо- граммы	11	286	28	23	59	175	345	41	−136	219	63	−58	
Знаки первых вступлений Р-волн	18	273	11	180	69	60	20	28	−67	174	63	−102	

Примечание. ¹ Ориентация оси задается двумя углами — углом погружения pl и азимутом azm ; ² ориентация нодальной плоскости задается двумя углами — азимутом простираения stk и углом падения dip . Угол подвижки $slip$ — угол в плоскости очага между направлением простираения и вектором подвижки (отсчитывается от направления простираения против часовой стрелки); ³ использована равноплощадная проекция нижней полусферы.

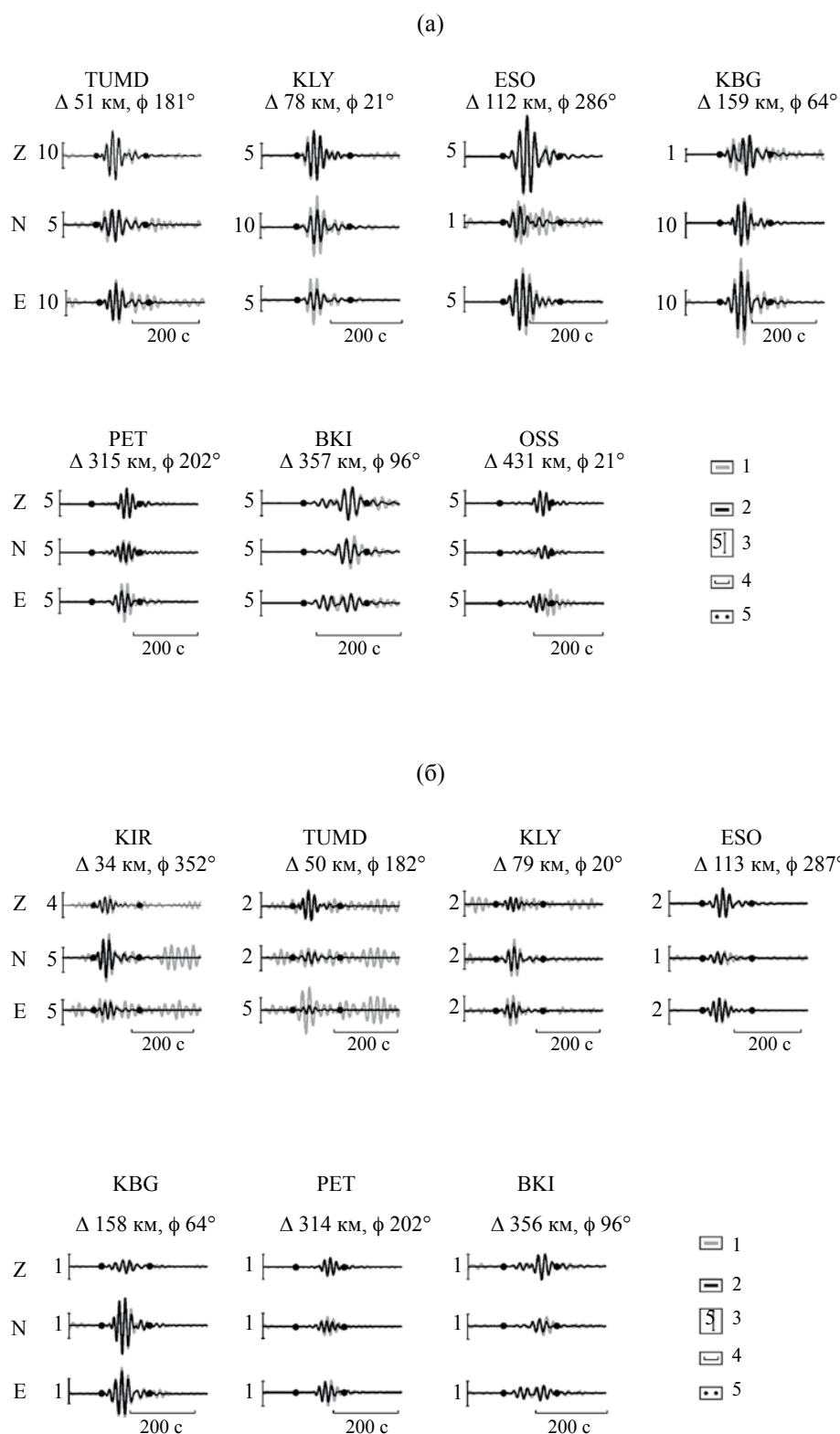


Рис. 6. Сопоставление волновых форм наблюдаемых (1) и синтетических (2) смещений Толудского землетрясения (а) и его сильнейшего афтершока (б), рассчитанных для оптимальных механизма и глубины 5 км. Приведен масштаб амплитуд (3) в единицах 10^{-4} см. Для каждой станции указаны эпицентральное расстояние Δ и азимут ϕ ; отмечен интервал в 200 секунд (4). Точками (5) отмечены концы интервала подгонки.

Механизмы очага ТЗ и АТЗ, рассчитанные двумя методами, хорошо согласуются между собой для основного толчка и отражают преимущественно сбросовый тип подвижки для афтершока (см. табл. 2). Землетрясения возникли под действием преобладающего по величине напряжения растяжения, ориентированного субширотно. По обеим нодальным плоскостям зафиксированы сбросы со сдвиговой компонентой. Отметим, что конфигурация области Толудской вспышки (см. рис. 3) не соответствует ни одной из двух возможных плоскостей разрыва, а линейные размеры афтершоковой области сопоставимы с точностью определения гипоцентров, поэтому затруднительно оценить ее реальные пространственные параметры. Тем более не следует обсуждать тонкую структуру облака афтершоков (например, их группирование см. рис. 3б, в), так как такая кластеризация может оказаться артефактом. Таким образом, мы не интерпретируем распределение гипоцентров в пространстве и не пытаемся увязать механизм очага ТЗ с его афтершоковым процессом, так как афтершоковое облако размазано ошибками. В соответствии с особенностями тектоники Толбачинской вулканической зоны (рифт ССВ простирается, см. рис. 1б) при выборе плоскости разрыва нами отдается предпочтение нодальной плоскости ССВ простирается NP2 (см. табл. 2).

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ СОТЯСЕНИЙ

Исторические извержения вулканов Камчатки (Ключевского, Толбачика, Шивелуча, Авачи, Кизимена, Желтовского и др.) нередко сопровождались ощутимыми землетрясениями, а интенсивность колебаний в населенных пунктах достигала ~7 баллов по шкале MSK-64 [Федотов, Шумилина, 1971; Токарев, 1981; Гусев, Шумилина, 2004; Гордеев и др., 2006; Сводка..., 2010; Крашенинников, 2013; и др.].

ТЗ произошло в удаленном ненаселенном районе, поэтому нет сведений о его макросейсмическом проявлении. Однако есть возможность оценить балльность по инструментальным данным [Аптикаев, 2012]. Воспользуемся шкалой сейсмической интенсивности [Землетрясения..., 2015], оценки интенсивности землетрясений по которой совпадают с оценками по шкалам MSK-64 и др. в пределах точности определений.

Сейсмические станции KLY (пос. Ключи, $\Delta \sim 78$ км) и TUMD (турбаза “Тумрок”, $\Delta \sim 50$ км) в дополнение к велосиметрам оснащены цифровыми акселерометрами. Пиковые ускорения (PGA) в этих пунктах составили для каналов “восток-запад”, “север-юг” и вертикального канала соответственно 4.5 см/с², 9.3 см/с²

и 3.6 см/с² для станции KLY и 8.9 см/с², 6.1 см/с² и 9.4 см/с² для станции TUMD, а пиковые скорости (PGV) — 0.05 см/с, 0.07 см/с, 0.04 см/с для станции KLY и 0.12 см/с, 0.09 см/с и 0.07 см/с для станции TUMD.

Для оценки балльности в этих двух пунктах мы использовали следующие параметры колебаний грунта: PGA, PGV, а также произведения $PGA \times PGV$ (мощность сейсмической волны) и $PGA \times \tau^{0.5}$ (интенсивность по Ариасу, где продолжительность колебаний $t = 5$ с, по [Землетрясения..., 2015]). В соответствии с рекомендациями [Землетрясения..., 2015] учитывались только максимальные значения для горизонтальной компоненты сейсмической записи. Средние арифметические значения PGA, PGV, $PGA \times \tau^{0.5}$, $PGA \times PGV$, соответствующие им значения балльности I и стандартного отклонения $\sigma(I)$, а также весовые функции f приведены в работе [Землетрясения..., 2015]. Для ТЗ оценка интенсивности колебаний, осредненная по указанному выше параметрам, с учетом f и σ составила на станции TUMD $I = 4.0 \pm 0.8$ балла, на станции KLY $I = 3.5 \pm 0.8$ балла. Отметим, что приведенные в статье [Гусев, Шумилина, 1999] зависимости спада балльности с расстоянием, рассчитанные для протяженных очагов землетрясений Курило-Камчатско-Японского региона, позволяют оценить балльность для события с $M_w \sim 5$ как $I \sim 7.5$ на удалении ~5 км от центра эпицентральной зоны и $I \sim 3-4$ на расстояниях 50–80 км, что приемлемо (в целях данной работы) согласуется с полученными выше значениями для ТЗ.

Для оценки балльности в эпицентральной зоне ТЗ использовано линейное уравнение макросейсмического поля $I = aM - b \lg h + c$, где h — глубина очага, a , b , c — эмпирические коэффициенты (для Камчатки $a = 1.5$, $b = 2.6$, $c = 2.5$), по [Землетрясения..., 2015]. В соответствии с этой формулой, для землетрясения с магнитудой $M \sim 5$ и глубиной гипоцентра $h \sim 6$ км I составляет ~8 баллов. Это же значение интенсивности может быть получено и при применении использовавшегося ранее для поверхностных землетрясений Камчатки уравнения макросейсмического поля из работы [Федотов, Шумилина, 1971]. Учитывая, что точность определения глубины ТЗ ~6 км ($h = 6 \pm 6$ км), интенсивность колебаний в его эпицентральной зоне могла превысить 8 баллов при меньшей глубине гипоцентра и могла быть ~7 баллов при глубине гипоцентра $h \sim 10-12$ км. Землетрясения с $I \sim 8$ баллов сопровождаются трещинами на грунте и более масштабными разрывными нарушениями. Подтвердить или опровергнуть наличие такого эффекта от ТЗ не представляется возможным, так как эпицентральной зона не посещалась и не обследовалась.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим Толудское облако землетрясений в последовательности событий, отражающих динамику сейсмической и вулканической активности Толбачинской зоны в конце ноября 2012 г., в начале ТТИ (рис. 7).

ТТИ, его хронология и результаты разносторонних исследований представлены в многочисленных публикациях [Салтыков и др., 2012; Гордеев и др., 2013; Двигало и др., 2014; Ермаков и др., 2014; Федотов и др., 2014; Кугаенко и др., 2015; Belousov et al., 2015; и др.]. Этому извержению посвящен специальный выпуск журнала “Journal of Volcanology and Geothermal Research”, который вышел 1.12.2015 г., объединив 17 статей российских и зарубежных ученых. Толудские землетрясения в этих работах детально не рассматривались, хотя и неоднократно обоснованно упоминались как Толудский рой.

Подготовка ТТИ была зарегистрирована инструментально: извержение предвещалось длительной малоглубинной сейсмической активизацией низкого энергетического уровня (август–ноябрь 2012 г.), которая протекала синхронно с развитием аномалии деформаций земной коры, выявленной независимо по GPS данным [Салтыков и др., 2012; Кугаенко и др., 2015; Kugaenko et al., 2015]. Последние три недели перед ТТИ сейсмичность анализируемого сейсмоактивного объема

находилась на *экстремально высоком* уровне по шкале СОУС’09 [Салтыков, 2011] и значительно усилилась 26.11.2012 г. Деформационные аномалии проявились во всей центральной части КГВ: было зарегистрировано сжатие в радиальном по отношению к извержению направлении и растяжение в тангенциальном [Кугаенко и др., 2015]. Эти процессы отражают внедрение дополнительных порций магмы в магматическую питающую систему в районе ТТИ.

Начало извержения было при отсутствии прямой видимости идентифицировано по сейсмическим данным: предположительно 5:15 27.11.2012 г. (здесь и далее используется время UTC) [Senyukov et al., 2015].

На южном склоне вулкана Плоский Толбачик и в северной части примыкающего к нему Толбачинского Дола в диапазоне высот ~1740–2360 м [Двигало и др., 2014] в это время началось образование зоны разрывов субмеридионального простирания длиной ~6 км, вдоль которой стали концентрироваться эруптивные центры. Это хорошо видно на карте эпицентров землетрясений, где 27.11.2012 г. сформировались две пространственно разнесенные группы землетрясений, первая из которых осталась связанной с вулканом Плоский Толбачик, а вторая образовалась в зоне начавшегося ТТИ (см. рис. 1г).

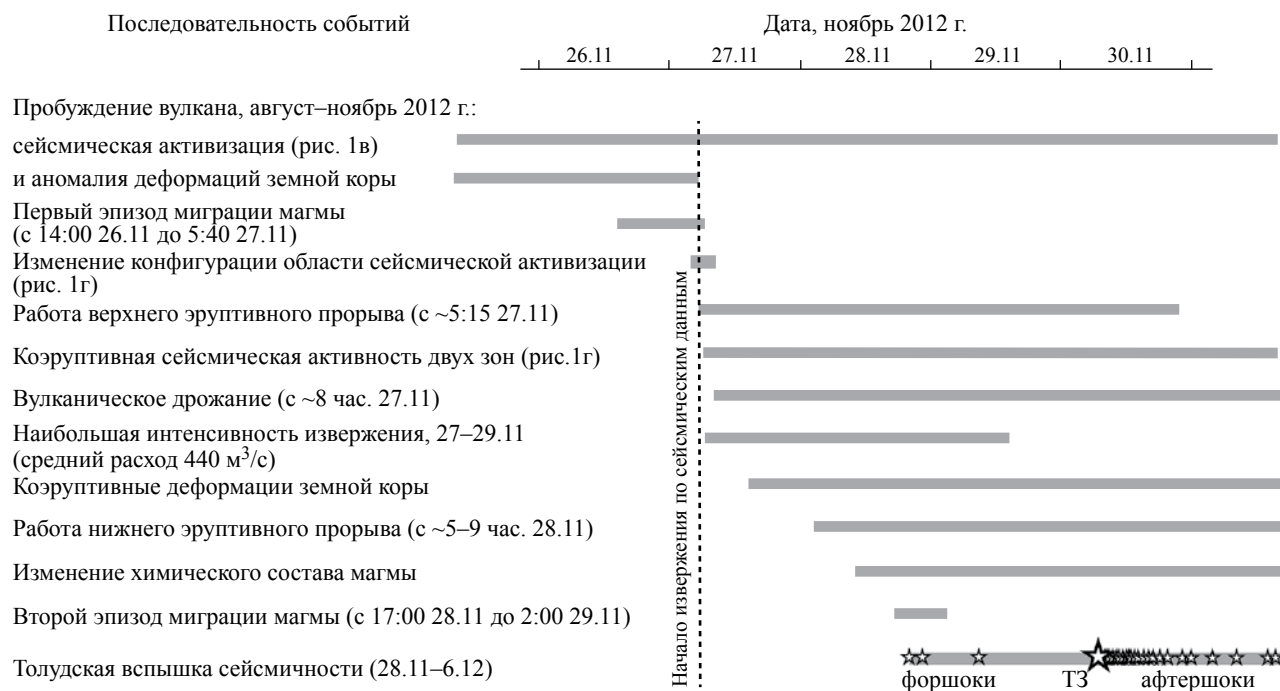


Рис. 7. Хронология основных событий, связанных с началом ТТИ. Их описание и ссылки на источники приведены в тексте.

В первые двое суток в эруптивном процессе доминировала верхняя часть трещинной зоны — верхний прорыв, или прорыв им. И.А. Меняйлова. Он действовал лишь до 30.11.2012 г. Примерно через сутки после начала извержения возник прорыв в нижней части трещинной зоны, называемый прорывом им. С.И. Набоко, в котором эруптивная активность ТТИ концентрировалась вплоть до его завершения в сентябре 2013 г. Время появления нижнего прорыва при отсутствии прямой видимости было обосновано комплексным анализом спутниковых и петрологических данных: ~5–9 ч 28.11.2012 г. [Melnikov, Volynets, 2015]. С нижним прорывом связано первое изменение химического состава изверженных пород в ходе ТТИ [Volynets et al., 2015].

В начальный период ТТИ в районе вулкана Плоский Толбачик происходили гигантские перемещения вещества. 27–29.11.2012 г. расход магмы составил 440 м³/с, объем изверженного материала достиг 0.072 км³ [Двигало и др., 2014]. В первые же дни извержения было зарегистрировано изменение знака главных деформаций и смещения земной поверхности в радиусе 60 км от эруптивных центров [Кугаенко и др., 2015; Kugaenko et al., 2015], что отражало быструю разгрузку очаговой области.

Но перемещения магмы не сводились лишь к ее выбросу на поверхность. В результате исследования сейсмических записей за 24–30.11.2012 г. методом SARA (Seismic Amplitude Ratio Analysis [Taisne et al., 2011]) было выявлено два эпизода скрытой миграции магмы [Caudron et al., 2015]. Первый эпизод, в ходе которого начальная вертикальная миграция магмы сменилась горизонтальной, начался примерно на 15 ч раньше объявленного момента извержения, 26.11.2012 г. в ~14 ч. Он окончился 27.11.2012 г. в 5:40, что примерно соответствует предположительному времени начала ТТИ. Второй выявленный эпизод миграции магмы в южном направлении (с ~17 ч 28.11.2012 г. до ~2 ч 29.11.2012 г.) по времени соответствует форшокам Толудского землетрясения и началу Толудской серии землетрясений.

28–30.11.2012 г. “центр тяжести” сейсмичности, сопровождавшей начало ТТИ, сместился в Толудскую эпицентральною зону — началась Толудская вспышка сейсмичности.

С высокой долей вероятности можно предположить, что ТТИ и Толудские землетрясения связаны парагенетически и имеют единую геодинамическую природу.

Исходя из имеющихся представлений о тектонике и магматических источниках Толбачинской вулканической зоны, рассмотрим два возможных сценария развития событий, которые могли привести к Толудской вспышке сейсмичности.

Толудская вспышка сейсмичности как результат развития субвертикальной интрузии в верхнем крыле наклонного магмоподводящего разлома

В статье [Ермаков и др., 2014] сформулирована гипотеза, объясняющая сейсмическую активность Толудской эпицентральной зоны: высказывается предположение, что асимметричное расположение гипоцентров землетрясений относительно осевой линии глубинного разлома связано с тем, что разлом (основной магмовод) круто падает на восток, уходя под Толудскую эпицентральною зону (см. рис. 1б, 1в). Далее предполагается, что в верхнем крыле разлома, на глубине в основном до 20 км, развиваются интрузии магмы, поступающей по разлому из глубины, и интрузии являются причиной землетрясений. На базе идей В.А. Ермакова и петрологических данных в работе [Belousov et al., 2015] обосновывается существование обширной силлообразной области накопления магнезиальных базальтов на глубине ~20 км под всей Толудской эпицентральной зоной. Она рассматривается авторами как возможный источник питания Северного прорыва БТТИ 1975 г., извержения 1941 г. и, вероятно, ряда других позднеголовых извержений Толбачинского Дола. Сейсмическая активизация перед началом БТТИ трактуется в указанной статье как результат продвижения магмы к поверхности именно из-под Толудской эпицентральной зоны. В соответствии с этой логикой мы считаем, что аналогичная ситуация могла бы развиваться и в 2012 г.: не исключена возможность формирования интрузии или еще одного прорыва ТТИ, если зона накопления магмы под Толудской эпицентральной зоной испытала некоторое активизирующее возмущение вслед за очагом ТТИ. В таком случае ТЗ можно интерпретировать как проявление локальной интрузивной активности, не вышедшей на поверхность. При этом интрузив мог привести к активизации трещины растяжения и землетрясениям со сбросовым механизмом. На наш взгляд, пока недостаточно данных, чтобы подтвердить и объяснить почти одновременную активизацию двух указанных зон магматического питания, существенно различных по составу изверженных пород. Эта задача выходит за рамки нашей статьи.

Толудская вспышка сейсмичности как результат латеральной миграции базальтов вдоль рифта

Учитывая выявленные в начале ТТИ эпизоды миграции магмы [Caudron et al., 2015], по аналогии с БТТИ 1975–1976 гг. можно предположить, что Толудская эпицентральною зона стала своеобразным резервуаром для базальтов, поступивших в нее по рифту с севера, из района

начавшегося извержения. Напомним события БТТИ, связываемые с сублатеральной миграцией базальтов. В 1975 г., в первые месяцы извержения, на фоне развития Северного БТТИ прорыва в вершинной кальдере вулкана Плоский Толбачик произошел провал, синхронный с сейсмической активизацией Толудской эпицентральной зоны. Затем деятельность Северного прорыва прекратилась, а сейсмичность стала мигрировать к югу, где через два дня на расстоянии ~25 км от вулкана Плоский Толбачик образовался новый эруптивный центр – Южный прорыв БТТИ. После завершения его эруптивной деятельности в конце 1976 г. сейсмичность не прекратилась, а вновь сместилась еще на 10–15 км южнее вдоль Толбачинского дола, но в этот раз магма на поверхность уже не вышла. Особенности развития извержения 1975–1976 гг., а также сейсмологические, геодезические и петрологические данные легли в основу предположения, что в 1975 г. имело место масштабное малоглубинное перемещение базальтов из-под вулкана Плоский Толбачик сначала в Толудскую зону, а затем в южную часть Толбачинского Дола [Геологические..., 1978; Большое..., 1984; Горельчик, Завьялов, 1986; Федотов и др., 1991; Магуськин, Магуськин, 2016; и др.]. В настоящее время накоплено довольно много фактов, свидетельствующих об аналогичных значительных, иногда многокилометровых латеральных перемещениях магмы в земной коре в вулканических районах [Sigmarsson et al., 2000; Ishizuka et al., 2008; Taisne et al., 2011; Grandin et al., 2012; Gonzalez et al., 2013; Sigmundsson et al., 2015; Tibaldi, 2015; Magee, 2016; и др.]. Поэтому можно предположить, что на начальной стадии ТТИ, 27–30.11.2012 г., могло происходить поступление магмы с севера, вдоль рифта, под Толудскую эпицентральною зону, что могло оказать расклинивающее действие на одну из трещин, субпараллельных главному магнеподводящему разлому Толбачинского Дола, и в результате 30.11.2012 г. произошло ТЗ, сопровождавшееся форшок-афтершоковым процессом. Такой ход событий, как и первый сценарий, не противоречит механизму ТЗ – сбросу под действием растяжения, ориентированного вкост трещине. По нашему мнению, второй вариант, объясняющий Толудскую вспышку сейсмичности перемещением магмы вдоль рифта, более реалистичен и вписывается в последовательность событий начальной фазы ТТИ.

Отметим, что в обоих случаях внедрение магмы могло сопровождаться и более слабой сейсмичностью ($K < 5.0$), которая из-за интенсивного вулканического дрожания не была зарегистрирована сетью сейсмических станций. Возможно, дальнейшие сейсмологические и др. исследования ТТИ принесут дополнительные аргументы, подтверждающие или опровергающие предложенные

сценарии. В обоих рассмотренных случаях ТЗ является тектоническим землетрясением, инициированным перемещением магмы, то есть вулканотектоническим землетрясением.

Однако пока нельзя исключить еще одну возможную причину Толудских землетрясений: перераспределение поля напряжений в ходе деформаций, возникших при подготовке ТТИ и интенсивном излиянии магмы 27–29.11.2012 г. Это предположение требует обоснования и ряда модельных расчетов. Но проведение таких расчетов будет затруднено из-за несовершенства GPS сети в районе вулкана Плоский Толбачик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована серия Толудских землетрясений 28.11–7.12.2012 г. – вспышка сейсмичности, сопровождавшая начало Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг., удаленная от эруптивной зоны на расстояние ~20 км к югу. Для двух сильнейших землетрясений из этой серии сейсмических событий (Толудского землетрясения с $M_L = 4.9$ и его сильнейшего афтершока с $M_L = 4.3$) по сейсмическим записям определены скалярный сейсмический момент, механизм очага, моментная магнитуда M_w , глубина эквивалентного точечного источника и размеры площадки разрыва. Проанализировано развитие афтершокового процесса Толудского землетрясения.

Интенсивность сотрясений в эпицентральной зоне Толудского землетрясения могла достигать ~8 баллов по шкале MSK-64, а в ближайших населенных пунктах, на расстоянии 50–80 км от эпицентра, по инструментальным данным оценивается в 3–4 балла.

В результате проделанной работы установлено:

- Толудская серия сейсмических событий является форшок-афтершоковым процессом Толудского землетрясения, а не обычным для вулканических областей сейсмическим роом;

- Толудское землетрясение произошло под действием напряжения растяжения, ориентированного вкост глубинному магнеподводящему разлому (рифту), питающему голоценовые трещинные извержения Толбачинского Дола;

- механизмы очага Толудского землетрясения и его афтершока близки и являются сбросами со сдвиговой компонентой, что соответствует проработке трещины раскрытия (разлома) в рифтовой зоне;

- простирание одной из нодальных плоскостей этих очагов соответствует простиранию рифта, что позволило выбрать ее в качестве плоскости разрыва.

Показано, что Толудское землетрясение и его форшок-афтершоковая последовательность

являются одной из сильнейших сейсмических активизаций, инструментально зарегистрированных в вулканических районах Камчатки.

Толудское облако землетрясений еще раз продемонстрировало, что, как и при Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг., сопровождавшие извержение процессы захватывали значительные пространственные области, не концентрируясь только в зоне эруптивных центров. Сопоставление с Большим трещинным Толбачинским извержением позволяет предположить, что в 2012 г. наблюдался аналогичный процесс глубинного перемещения магмы из-под постройки вулкана Плоский Толбачик в южном направлении, который, однако, не завершился извержением, а проявился в виде Толудской серии землетрясений.

В данной работе представлен первый пример использования широкополосных сейсмических записей для расчета механизма очагов землетрясений Ключевской группы вулканов. Опыт оказался удачным и показывает, что существующая сеть широкополосных станций обеспечивает хороший азимутальный охват этой вулканической группы. В перспективе разработанная и примененная здесь технология позволит проводить аналогичные расчеты механизмов очагов и моментной магнитуды для достаточно сильных ($M \sim 4-5$) землетрясений из указанного района, которые не включаются в обработку в мировых центрах данных.

Исследование частично поддержано РФФИ (научные проекты 13-05-00117, 17-05-00127).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: Наука и образование, 2012. 176 с.
- Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка). М.: Наука, 1984. 637 с.
- Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 130 с.
- Геологические и геофизические данные о Большом Толбачинском извержении 1975–1976 гг. М.: Наука, 1978. 256 с.
- Гордеев Е.И., Муравьев Я.Д., Самойленко С.Б. и др. Трещинное Толбачинское извержение 2012–2013 гг. Первые результаты // ДАН. 2013. Т. 452. № 5. С. 562–566.
- Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И. и др. Мелкофокусные землетрясения п-ова Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 28–38.
- Гордеев Е.И., Дроздин Д.В., Касахара М. и др. Сейсмические явления, связанные с извержениями вулканов в Карымском вулканическом центре в 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 28–48.
- Гордеев Е.И., Кугаенко Ю.А., Чебров В.Н. Сейсмичность Кроноцкого полуострова // Вулканология и сейсмология. 1991. № 3. С. 68–78.
- Горельчик В.И., Завьялов А.Д. Поведение параметра плотности сейсмогенных разрывов при подготовке и развитии Большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 1986. № 6. С. 60–66.
- Горельчик В.И., Зобин В.М., Токарев П.И. Сейсмичность вулканов // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 61–77.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.
- Гусев А.А., Шумилина Л.С. Моделирование связи балл-магнитуда-расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4/5. С. 29–40.
- Гусев А.А., Шумилина Л.С. Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34–42.
- Двигало В.Н., Свирид И.Ю., Шевченко А.В. Первые количественные оценки параметров Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. по данным аэрофотограмметрических наблюдений // Вулканология и сейсмология. 2014. № 5. С. 3–11.
- Ермаков В.А., Гонтовая Л.И., Сеньюков С.Л. Тектонические условия и магматические источники нового Толбачинского трещинного извержения (п-ов Камчатка) // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 1. С. 5–33.
- Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. ГОСТ-Р. Проект, 2-я редакция. М.: Стандартинформ, 2015. 32 с.
- Зобин В.М., Фирстов П.П., Иванова Е.И. Рой землетрясений в районе вулкана Карымский в январе–феврале 1978 года // Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 64–73.
- Крашенинников С.П. Описание земли Камчатки. М.: Эксмо, 2013. 475 с.
- Кугаенко Ю.А., Титков Н.Н., Салтыков В.А., Воронев П.В. Анализ подготовки Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. в параметрах сейсмичности и деформаций земной коры по данным системы комплексного мониторинга активности вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2015. № 4. С. 40–58.
- Левина В.И., Иванова Е.И., Гордеев Е.И. и др. Карымское землетрясение 1 января 1996 года ($M_S = 7.0$) // Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. М.: ГС РАН, 2002. С. 129–137.

- Магуськин М.А., Магуськин В.М. Вертикальные смещения земной поверхности вдоль протяженных нивелирных трасс в южной зоне Толбачинских шлаковых конусов после окончания БТТИ 1975–1976 гг. и их возможные причины (Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 210–233.
- Павлов В.М. Расчет синтетических сейсмограмм в слоисто-однородной изотропной упругой среде // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 191–195.
- Павлов В.М., Абубакиров И.Р. Алгоритм расчета тензора сейсмического момента сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам объемных волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 149–158.
- Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В. Об аномалии сейсмического режима, предвалявшей новое (2012 г.) трещинное Толбачинское извержение на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 16–19.
- Сводка макросейсмических сведений по землетрясениям Камчатки. (Доинструментальный и ранний инструментальный период наблюдений.) Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. 134 с.
- Сенюков С.Л., Нужи́дина И.Н., Дрознина С.Я. и др. Сейсмичность вулкана Кизимен // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 140–144.
- Сильные камчатские землетрясения 2013 года. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2014 г. 252 с.
- Токарев П.И. Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 года и его предвестники // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. № 9. С. 11–22.
- Токарев П.И. Асачинский рой землетрясений и его природа (Камчатка, март–апрель 1983 года) // Вулканология и сейсмология. 1984. № 3. С. 3–13.
- Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
- Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим Карымского вулкана в 1965–1986 гг. // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 3–13.
- Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- Федотов С.А. Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 3–37.
- Федотов С.А., Шумилина Л.С. Сейсмическая сотрясаемость Камчатки // Физика Земли. 1971. № 9. С. 3–15.
- Федотов С.А., Балеста С.Т., Двигало В.Н. и др. Новые Толбачинские вулканы // Действующие вулканы Камчатки. 1991. М.: Наука, 1991. С. 214–281.
- Федотов С.А., Славина Л.Б., Сенюков С.Л., Кучай М.С. Сейсмические процессы и перемещение магм, происходившие при Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. и Трещинном Толбачинском извержении 2012–2013 гг. // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 3. С. 5–30.
- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.
- Belousov A., Belousova M., Edwards B. et al. Overview of the precursors and dynamics of the 2012–13 basaltic fissure eruption of Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2015. V. 307. P. 22–37.
- Caudron C., Taisne B., Kugaenko Yu., Saltykov V. Magma migration at the onset of the 2012–13 Tolbachik eruption revealed by Seismic Amplitude Ratio Analyses // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2015. V. 307. P. 60–67.
- Gonzalez P.J., Samsonov S.V., Pepe S. et al. Magma storage and migration associated with the 2011–2012 El Hierro eruption: implications for crustal magmatic systems at oceanic island volcanoes // J. Geophys. Res. Solid Earth 2013. V. 118. № 8. P. 4361–4377.
- Grandin R., Jacques E., Nercessian A. et al. Seismicity during lateral dike propagation: Insights from new data in the recent Manda Hararo–Dabbahu rifting episode (Afar, Ethiopia) // Geochem. Geophys. Geosyst. 2012. V. 12. Q0AB08. P. 1–24.
- Hanks T.C., Kanamori H.A. Moment magnitude scale // J. of Geophys. Res. 1979. V. 84. № B5. P. 2348–2350.
- Ishizuka O., Geshi N., Itoh J. et al. The magmatic plumbing of the submarine Hachijo NW volcanic chain, Hachijojima, Japan: long-distance magma transport? // J. of Geophys. Res. 2008. V. 113. B08S08.
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes // Geophys. J. Int. 1995. V. 122. № 1. P. 108–124.
- Kugaenko Yu., Titkov N., Saltykov V. Constraints on unrest in the Tolbachik volcanic zone in Kamchatka prior the 2012–13 flank fissure eruption of Plosky Tolbachik volcano from local seismicity and GPS data // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2015. V. 307. P. 38–46.
- Magee C., Muirhead J.D., Karvelas A. et al. Lateral magma flow in mafic sill complexes // Geosphere. 2016. V. 12. № 3. P. 809–841.
- Melnikov D., Volynets A.O. Remote sensing and petrological observations on the 2012–2013 fissure eruption at Tolbachik volcano, Kamchatka: Implications for

- reconstruction of the eruption chronology // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. V. 307. P. 89–97.
- Senyukov S.L., Nuzhdina I.N., Droznina S. Ya. et al.* Seismic monitoring of the Plosky Tolbachik eruption in 2012–2013 // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. V. 307. P. 47–59.
- Sigmarsson O., Karlsson H.R., Larsen G.* The 1996 and 1998 subglacial eruptions beneath the Vatnajökull ice sheet in Iceland: contrasting geochemical and geophysical inferences on magma migration // *Bull. Volcanol.* 2000. V. 61. P. 468–476.
- Sigmundsson F., Hooper A., Hreinsdottir S. et al.* Segmented lateral dyke growth in a rifting event at Bargarbunga volcanic system, Iceland // *Nature.* 2015. V. 517. P. 191–195.
- Taisne B., Brenguier F., Shapiro N.M., Ferrazzini V.* Imaging the dynamics of magma propagation using radiated seismic intensity // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L04304.
- Tibaldi A.* Structure of volcano plumbing systems: A review of multi-parametric effects // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. V. 298. P. 85–135.
- Volynets A., Edwards B., Melnikov D. et al.* Monitoring of the volcanic rock compositions during the 2012–2013 fissure eruption at Tolbachik volcano, Kamchatka // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. V. 307. P. 120–132.