

ТОЛУДСКОЕ ВУЛКАНОТЕКТОНИЧЕСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ

30 ноября 2012 г. с $K_S=11.3$, $M_w=4.8$, $I_0^p=7-8$ и Толудская вспышка сейсмичности, сопровождавшие начало ТРЕЩИННОГО ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ (Камчатка)

Ю.А. Кузнецов, В.М. Павлов, Е.И. Иванова, И.Р. Абубакиров,
В.А. Салтыков, П.В. Воронаев

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, ku@emsd.ru

Аннотация. С 28 ноября по 7 декабря 2012 г. в юго-западном секторе Ключевской группы вулканов, в Толудской эпицентральной зоне, регистрировалась серия мелкофокусных землетрясений, по времени совпадающая с начальной фазой Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. Наиболее сильное землетрясение – Толудское вулканотектоническое землетрясение 30 ноября 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, зарегистрированных в вулканических районах Камчатки. По инструментальным данным выполнена оценка интенсивности сотрясений, вызванных Толудским землетрясением: $I_0=7-8$. Для Толудского землетрясения и его сильнейшего афтершока с $M_c=4.6$ по данным камчатских широкополосных сейсмических станций были рассчитаны 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 рифтовой зоне.

Abstract. From November 28 to December 7, 2012 in the southwestern sector of the Klyuchevskaya volcanic group, in Tolud epicentral region, a series of shallow earthquakes was registered, accompanied the beginning of the 2012–2013 Tolbachik fissure eruption. The strongest earthquake of this series – the November 30, 2012 Tolud volcanotectonic earthquake of $K_S=11.3$, $M_L=4.9$, $M_c=5.4$, $M_w=4.8$ – is one of the five strongest seismic events recorded at the depth of 10 km under the Klyuchevskaya volcanic group in 1961–2017. According to the parametric analysis, the Tolud seismic series is a foreshock-aftershock process of the Tolud earthquake. This is one of the most significant seismic activations registered in the Kamchatka volcanic regions. According to the instrumental data, the intensity of ground motions, caused by the Tolud earthquake was estimated as $I_0=7-8$. For the Tolud earthquake and its strongest aftershock with $M_c=4.6$, the source mechanism and moment magnitude were calculated from the data of Kamchatka broadband seismic stations. This information is not available in the world's seismological data centers. The focal mechanisms of the Tolud earthquake and its strongest aftershock correspond to the rupture under a tensile stress in the rift zone.

С 28 ноября по 7 декабря 2012 г. в юго-западном секторе Ключевской группы вулканов регистрировалась серия мелкофокусных землетрясений, по времени совпадающая с начальной фазой (первыми днями) Трещинного Толбачинского извержения (ТТИ) 2012–2013 гг. [1, 2]. Эпицентры мелкофокусных землетрясений концентрировались в долине р. Толуд, поэтому обсуждаемая последовательность сейсмических событий названа Толудским облаком или Толудской серией землетрясений, а ее максимальный ($K_S=11.3$, $M_L=4.9$) толчок, зарегистрированный 30 ноября в 11^h00^m, Толудским землетрясением (ТЗ) (рис. 1, табл. 1). Ранее исследователи сейсмичности южной части Ключевской группы вулканов называли этот район Толудской эпицентральной зоной [3]. 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 влк. 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.

Эпицентры Толудского облака землетрясений образуют компактную группу размером ~ 5×10 км, вытянутую субширотно в 20 км к югу от влк. Плоский Толбачик (рис. 1). В целом Толудское облако землетрясений тяготеет к восточному краю протяженного рифта север-северо-восточного простирания (рис. 2), проходящего через вершину влк. Плоский Толбачик и зону моногенных вулканов Толбачинского дола, и питающих эруптивных центров голоценовых извержений [4].

ТЗ входит в число пяти сильнейших сейсмических событий, зарегистрированных на глубине до 10 км под всей Ключевской группой вулканов за годы детальных сейсмологических наблюдений (1961–2017 гг.). Такими были землетрясения, предварявшие в 1975 г. Большое трещинное Толбачинское извержение (БТТИ) [3]. ТЗ вывело уровень сейсмической активности Толудской эпицентральной зоны во временных окнах более 11 суток на экстремально высокий уровень по шкале СОУС'09 [5].

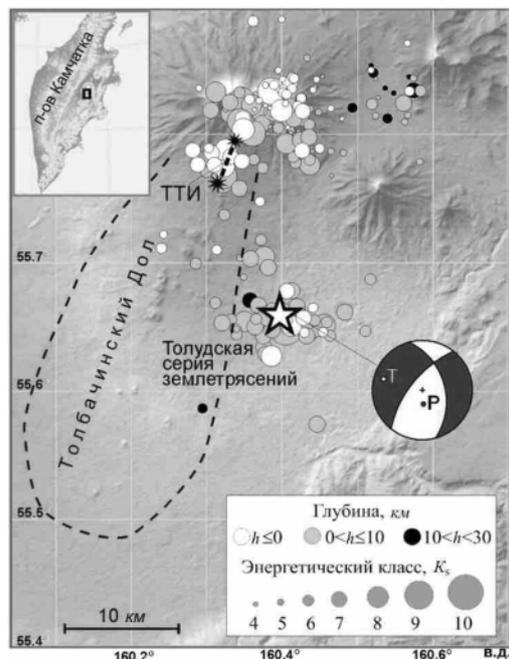


Рис. 1. Сейсмичность, сопровождавшая ТТИ с 27.11.2012 г. по 01.01.2013 г.; выделен эпицентр Толудского землетрясения (звезда) и представлен механизм его очага в диаграфической проекции нижней полусферы, рассчитанный по широкополосным сейсмическим записям (*T* – ось растяжения, *P* – ось сжатия); черным пунктиром очерчена условная граница Толбачинского дола

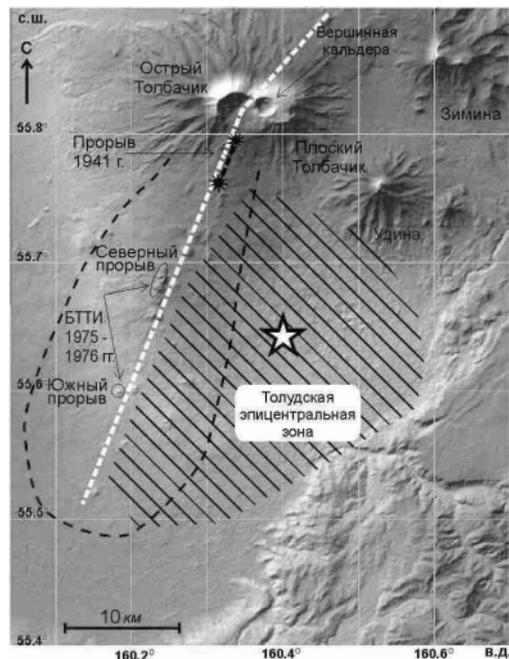
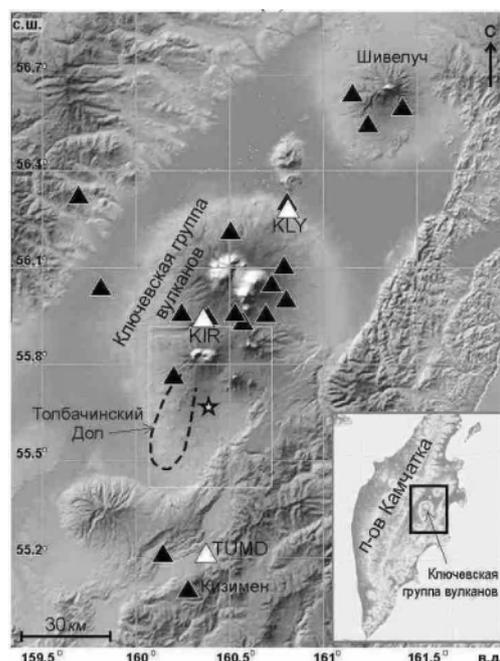


Рис. 2. Схема Толбачинской вулканической зоны; отмечены эруптивные центры исторических извержений: 1941 г., БТТИ 1975–1976 гг. и ТТИ 2012–2013 гг.; светлый пунктир – осевая линия зоны глубинного магмоподводящего разлома (рифта); штриховкой выделена Толудская эпицентральной зона; звезда – эпицентр Толудского землетрясения

Инструментальные данные. По данным ISC [6], главный толчок зарегистрировали 385 сейсмических станций Земли, максимальный афтершок – 73 станции. Параметры очагов ТЗ и АТЗ были определены в КФ ФИЦ ЕГС РАН по записям камчатских сейсмических станций с привлечением данных мировой сети. Характеристики камчатской системы сейсмического мониторинга приведены в [7, 8], а сейсмические станции, контролирующие Ключевскую группу вулканов, представлены на рис. 3.

Рис. 3. Эпицентр Толудского землетрясения (звезда) на схеме сейсмических станций, расположенных в районе Ключевской группы вулканов; прямоугольником выделен фрагмент карты, представленный более подробно на рис. 1, 11; широкополосные сейсмические станции выделены белым цветом



Региональное решение параметров гипоцентров главного толчка и максимального афтершока приведены в табл. 1 и на рис. 4 в сопоставлении с решениями основных международных агентств.

Таблица 1. Основные параметры главного толчка Толудского землетрясения (ТЗ) и его сильнейшего афтершока 30 ноября 2012 г. в 11^h00^m и в 12^h49^m по региональным данным (KRSC) в сопоставлении с определениями других агентств

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр						Магнитуда	Источник
			φ° , N	δ , км	λ° , E	δ , км	h , км	δh , км		
Главный толчок										
KRSC	11 00 31.39	0.26	55.659	6.1	160.406	6.1	6.5	5.9	$K_S=11.3/5$, $M_c=5.4/5$	[9, 10]
MOS	11 00 30.90	0.97	55.685	7.4	160.395	3.5	8		$M_S=4.1/12$, $MPSP=4.8/54$	[11]
ISC	11.00.32.52	0.28	55.6837	4.4	160.3962	3.1	10f 40.4 _{pp}		$M_S=(4.5\pm 0.3)/33$, $m_b=(4.6\pm 0.2)/217$	[6]
NEIC	11 00 37.70	0.70	55.5890	5.7	160.2680	3.2	46.9	7.1	$m_b=4.6/169$	[6]
IDC	11 00 36.56	1.88	55.5813	13.1	160.3757	9.7	40	16.7	$M_S=(4.2\pm 0.1)/21$, $m_b=(4.1\pm 0.1)/29$	[6]
ВJI	11 00 34.50		55.79		160.70				$M_S=5.0/38$, $m_b=4.8/47$	[6]
Максимальный афтершок										
KRSC	12 49 33.18	0.26	55.648	6.3	160.418	6.3	4.7	6.3	$K_S=10.0/4$, $M_c=4.6/3$	[9, 10]
MOS	12 49 32.8	1.08	55.65	11.4	160.41	4.0	6		$MPSP=4.2/6$	[11]
ISC	12 49 33.45	1.13	55.6647	6.0	160.4066	3.3	9.9	7.7	$M_S=(3.4\pm 0.1)/6$, $m_b=(4.1\pm 0.2)/20$	[6]
NEIC	12 49 36.75	0.42	55.8710	15.6	160.0400	7.7	35f		$m_b=4.4/2$	[6]
IDC	12 49 31.36	0.65	55.8986	24.3	160.0968	13.8	0f		$M_S=(3.5\pm 0.0)/8$, $m_b=(3.8\pm 0.1)/13$	[6]

Примечание. K_S – энергетический класс по классификации С.А. Федотова [12]; сведения об агентствах см. в обозначениях к наст. ежегоднику.

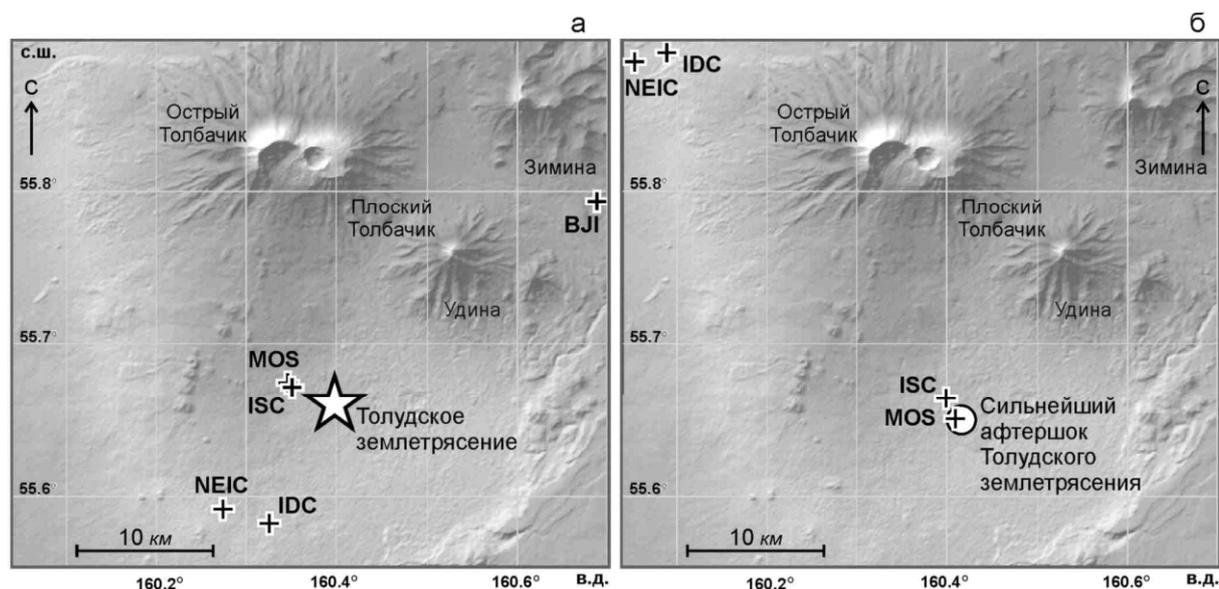


Рис. 4. Решения эпицентра Толудского землетрясения 30 ноября в 11^h00^m с $K_S=11.3$ (а) и его максимального афтершока в 12^h49^m с $K_S=10.0$ (б) [9] по данным близких станций сети KRSC и других агентств (табл. 1). Инструментальные эпицентры по данным MOS, ISC, NEIC, IDC, ВJI отмечены крестом.

Наилучшее согласие с региональным решением как для главного толчка, так и для максимального афтершока дают агентства ISC и MOS. Отметим резкое несовпадение глубины главного толчка по глубинной фазе pP по данным ISC, равной $h_{pp}\sim 40$ км, с региональным определением глубины $h=6$ км (табл. 1).

Примеры сейсмических записей ТЗ и его максимального афтершока (АТЗ, $12^{\text{h}}49^{\text{m}}$, $K_S=10.0$, $M_L=4.3$, $M_c=4.6$) приведены на рис. 5. Как видим, оба события имеют четкие вступления продольных и поперечных волн, что соответствует характеру записи тектонического землетрясения.

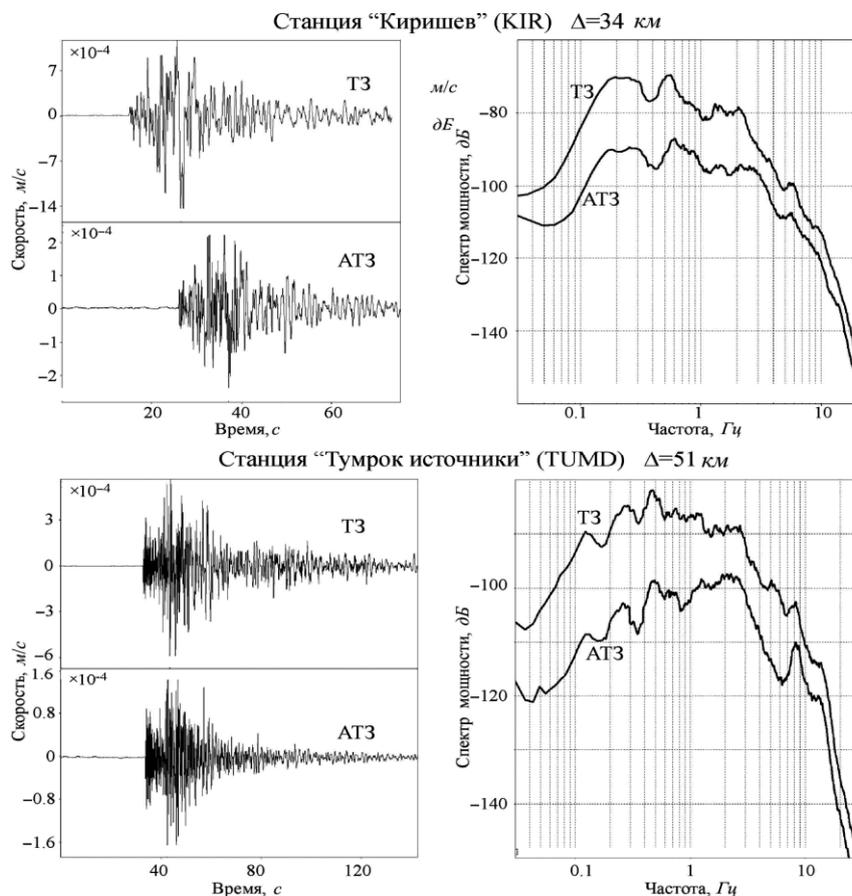


Рис. 5. Примеры записей Толудского землетрясения и его сильнейшего афтершока широкополосными сейсмическими станциями и их спектры (вертикальный канал)

Предваряющая сейсмичность и афтершоки Толудского землетрясения. С 2000 г. по октябрь 2012 г. в объеме среды, охваченной Толудским облаком землетрясений (в приближенных координатах $\varphi=55.61-55.72$ N, $\lambda=160.21-160.55$ E, на глубине $h < 25$ км), ежемесячно в среднем регистрировалось около трех сейсмических событий с $K_S=3.1-9.8$, из них в среднем одно событие представительного класса, который для Толудской эпицентральной зоны составляет $K_{S \min}=5.0$. В ноябре зарегистрированы четыре события, из которых одно, самое слабое ($K_S=5.0$), реализовалось 14 ноября, а три других непосредственно перед главным толчком: 28 ноября в $20^{\text{h}}31^{\text{m}}$ и $20^{\text{h}}56^{\text{m}}$ с $K_S=6.6$ и 6.8 ; 29 ноября – в $09^{\text{h}}11^{\text{m}}$ с $K_S=6.4$ [10]. По-видимому, только эти три события можно назвать форшоками [13], а все толчки до них отнести к фоновым.

Уровень представительной регистрации $K_{S \min}$ для Толудского облака землетрясений из-за интенсивного вулканического дрожания на начальной стадии ГТИ оказался достаточно высоким: $K_{S \min}=6.2$ (рис. 6 а).

Пространственно Толудское облако землетрясений не связано ни с предварявшей ГТИ сейсмической активизацией, детально описанной в [13, 14], ни с областью землетрясений эруптивной зоны (рис. 1). Согласно годовому каталогу вулканических землетрясений Северной группы вулканов [10], с 28 ноября по 7 декабря было локализовано более 70 сейсмических событий с $K_S \geq 5.2$, в результате которых выделилась суммарная сейсмическая энергия $\Sigma E \sim 2.1 \cdot 10^{11}$ Дж. Глубина землетрясений в основном не превышает 10 км, причем большинство афтершоков расположены выше основного события. Невязки определения координат Толудских землетрясений составляют для эпицентров 4 ± 1 км, для глубины – 5 ± 2 км (погрешность соответствует среднеквадратичному отклонению). Два наиболее сильных афтершока с $K_S=9.6$ и $K_S=10.0$ произошли 30 ноября в течение первых двух часов после основного события.

Изменение числа афтершоков во времени представлено на рис. 6 б. Анализ затухания афтершокового процесса (рис. 6 в) показал, что после ТЗ в течение ~3 суток наблюдалась афтершоковая последовательность землетрясений, интенсивность которой убывала по гиперболическому закону Омори $\frac{dN}{dt} = \frac{1}{t^p}$ с $p=1$ (N – число афтершоков, t – время, p – параметр Омори). Эта фаза сменилась эпизодом более слабой сейсмичности (с 07^h30^m 3 декабря по 03^h09^m 5 декабря), который имел характер роя с $K_S=5.7-7.9$ и практически постоянной скоростью сейсмического потока, после чего сейсмическая активность Толудского облака угасла.

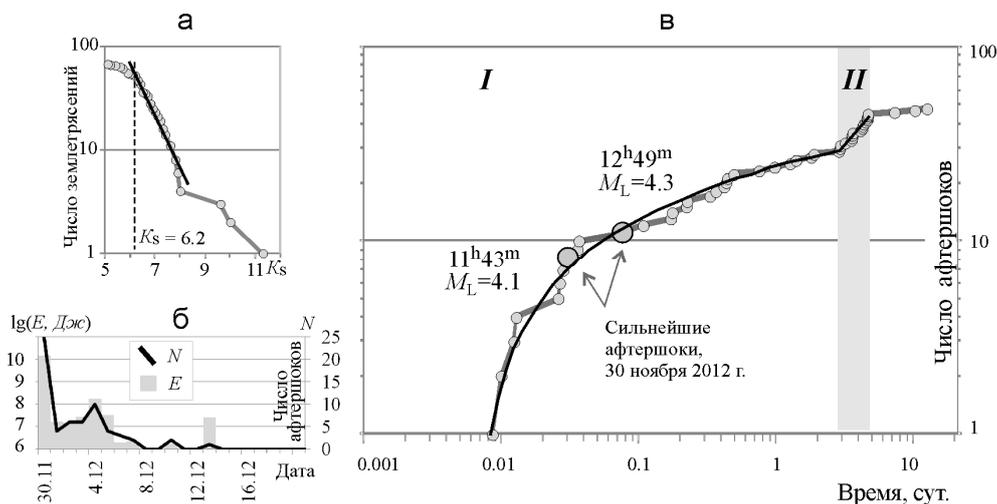


Рис. 6. Афтершоковый процесс Толудского землетрясения: а – кумулятивный график повторяемости для Толудского облака землетрясений; б – изменение во времени числа афтершоков (N) и выделившейся сейсмической энергии (E); в – характерные фазы развития афтершокового процесса (за начало отсчета взято время основного события); отмечены временные границы выделенных фаз: афтершоковой последовательности (I) и роя (II).

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

Механизмы очагов ТЗ и АТЗ построены двумя способами: по знакам первых вступлений объемных волн с помощью программы FA2011 А.В. Ландера [15] и по широкополосным цифровым сейсмограммам путем расчета тензора сейсмического момента. 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 и является более информативным и надежным. Оба землетрясения имеют довольно четкие P -вступления (рис. 5). 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 (табл. 2).

Таблица 2. Параметры очагов землетрясений, определенные по широкополосным сейсмограммам

Событие	M_0 , Н·м	M_w	h , км	S , км ²	D , км	τ , с	ϵ , %
ТЗ	$1.9 \cdot 10^{16}$	4.8	5	5.00	2.6	2	28
АТЗ	$2.9 \cdot 10^{15}$	4.2	5	1.26	1.2	0	44

Примечание. M_w – моментная магнитуда; S – площадь разрыва; h – глубина эквивалентного точечного источника; D – линейные размеры разрыва; τ – длительность разрыва для главного толчка (для афтершока – мгновенный источник, т.е. с $\tau=0$); ϵ – остаточная невязка (сумма квадратов отклонений отсчетов синтетических и наблюдаемых сейсмограмм, нормированная на сумму квадратов отсчетов наблюдаемых сейсмограмм).

Процедура оценки механизма по волновым формам описана в работе [16]. Собственно механизм – пара нодальных плоскостей для P -волн на фокальной сфере – 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 параметры нодальных плоскостей в очаге и значение скалярного сейсмического момента M_0 . Согласно [17], M_0 определяет величину моментной магнитуды по формуле:

$$M_w = 2/3 \cdot (\lg M_0 [H \cdot м] - 9.1). \quad (1)$$

Предварительно по записям приборов восстанавливались «истинные» смещения. Для расчета синтетических сейсмограмм использовался модифицированный вариант глобальной модели Земли АК135 [18]. 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).

Результаты расчета механизма для основного толчка и его афтершока приведены на рис. 7. Для обоих событий оптимальный механизм соответствует глубине 5 км.

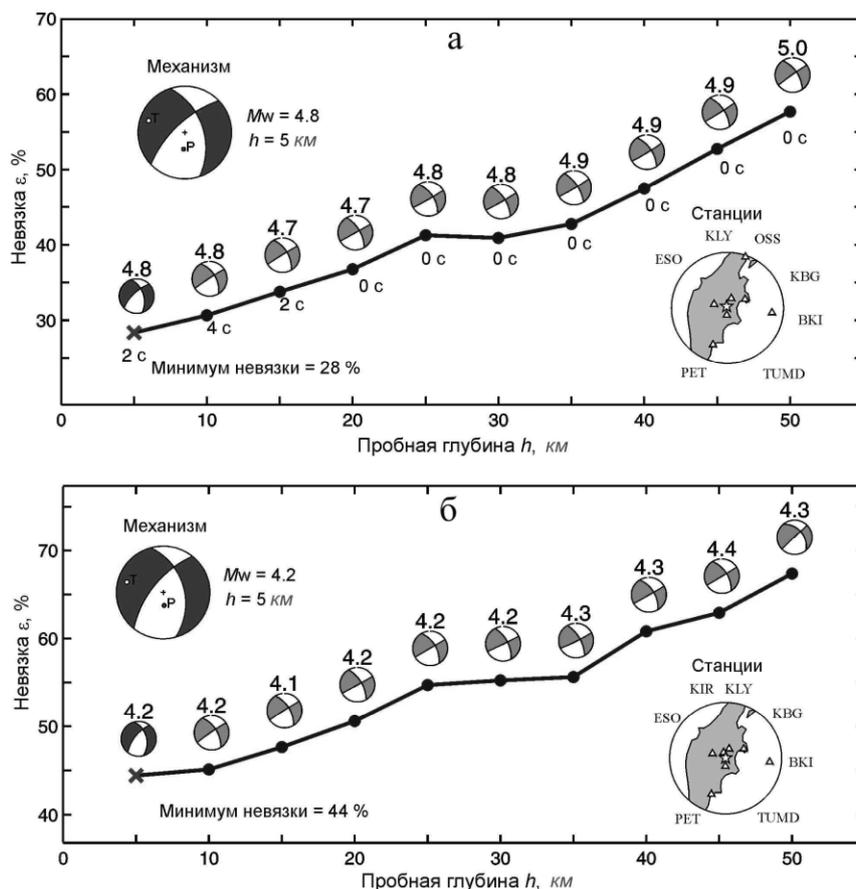


Рис. 7. Результаты расчета ТСМ типа «двойной диполь без момента» для Толудского землетрясения (а) и его сильнейшего афтершока (б). Показана зависимость остаточной невязки ϵ от пробной глубины (с шагом 5 км), где остаточная невязка есть сумма квадратов разностей между отсчетами синтетических и наблюдаемых 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, $\tau=0$ 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.

На рис. 8 представлены волновые формы наблюдаемых смещений и смещений, рассчитанных с использованием оптимальных ТСМ.

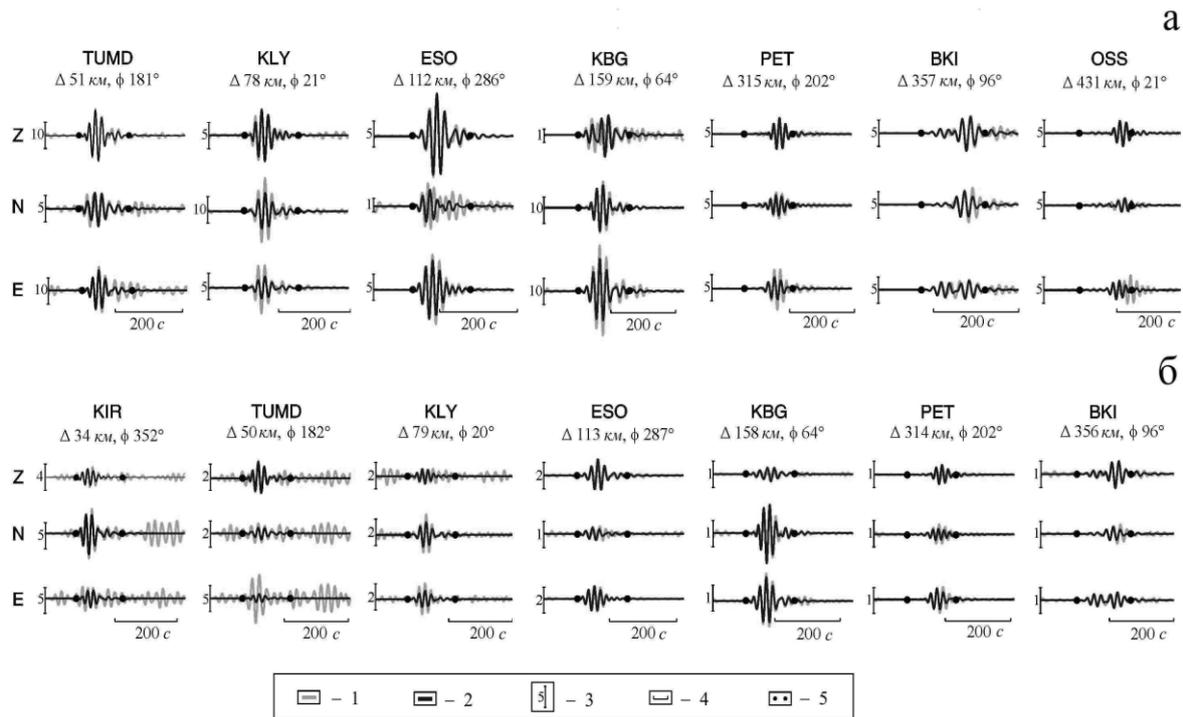


Рис. 8. Сопоставление волновых форм наблюдаемых (1) и синтетических (2) смещений Толудского землетрясения (а) и его сильнейшего афтершока (б), рассчитанных для оптимальных механизма и глубины 5 км

Приведен масштаб амплитуд (3) в единицах 10^{-4} см. Для каждой станции указаны эпицентральное расстояние Δ и азимут ϕ ; отмечен интервал в 200 с (4). Точками (5) отмечены концы интервала подгонки.

Моментная магнитуда Толудского землетрясения составляет $M_w=4.8$, максимального афтершока – $M_w=4.2$. На основе значения моментной магнитуды получены оценки протяженности очагов Толудских землетрясений. В соответствии с работой [19], площадь разрыва в табл. 2 определена на основе корреляционной зависимости вида:

$$\lg S, \text{ км}^2 = M_w - 4.1. \quad (2)$$

Если площадка разрыва является кругом с радиусом R , то для основного толчка $R=1.3$ км; для афтершока $R=0.6$ 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.

Механизмы очага ТЗ и АТЗ, рассчитанные двумя методами, хорошо согласуются между собой для основного толчка и отражают преимущественно сбросовый тип подвижки для афтершока (табл. 3). Соответствующие диаграммы изображены на рис. 9.

Таблица 3. Параметры механизма очага Толудского землетрясения и его сильнейшего афтершока

Использованные данные	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
	<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>DP</i>	<i>SLIP</i>	<i>STK</i>	<i>DP</i>	<i>SLIP</i>
Толудское землетрясение												
Широкополосные сейсмограммы	11	289	37	27	50	185	342	47	-146	227	66	-49
Знаки первых вступлений <i>P</i> -волн	0	286	28	16	62	196	351	51	-126	221	51	-53
Сильнейший афтершок Толудского землетрясения												
Широкополосные сейсмограммы	11	286	28	23	59	175	345	41	-136	219	63	-58
Знаки первых вступлений <i>P</i> -волн	18	273	11	180	69	60	20	28	-67	174	63	-102

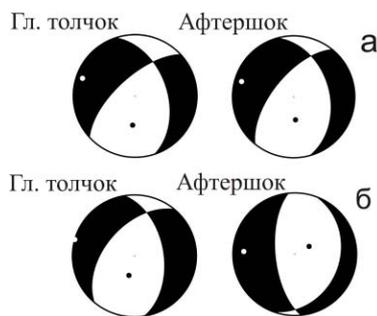


Рис. 9. Диаграммы механизма очага Толудского землетрясения и его сильнейшего афтершока в проекции нижней полусферы (расчеты выполнены по тензору сейсмического момента с использованием широкополосных сейсмических записей (а) и по знакам первых вступлений *P*-волн (б))

1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений растяжения и сжатия соответственно; затемнена область волн сжатия.

Землетрясения возникли под действием превалирующего по величине напряжения растяжения, ориентированного субширотно. По обеим нодальным плоскостям зафиксированы сбросы со сдвиговой компонентой. Отметим, что конфигурация области Толудской вспышки (рис. 10) 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 на рис. 10 б, 10 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 север–северо-восточного простирания) при выборе плоскости разрыва отдается предпочтение нодальной плоскости север–северо-восточного простирания *NP2*.

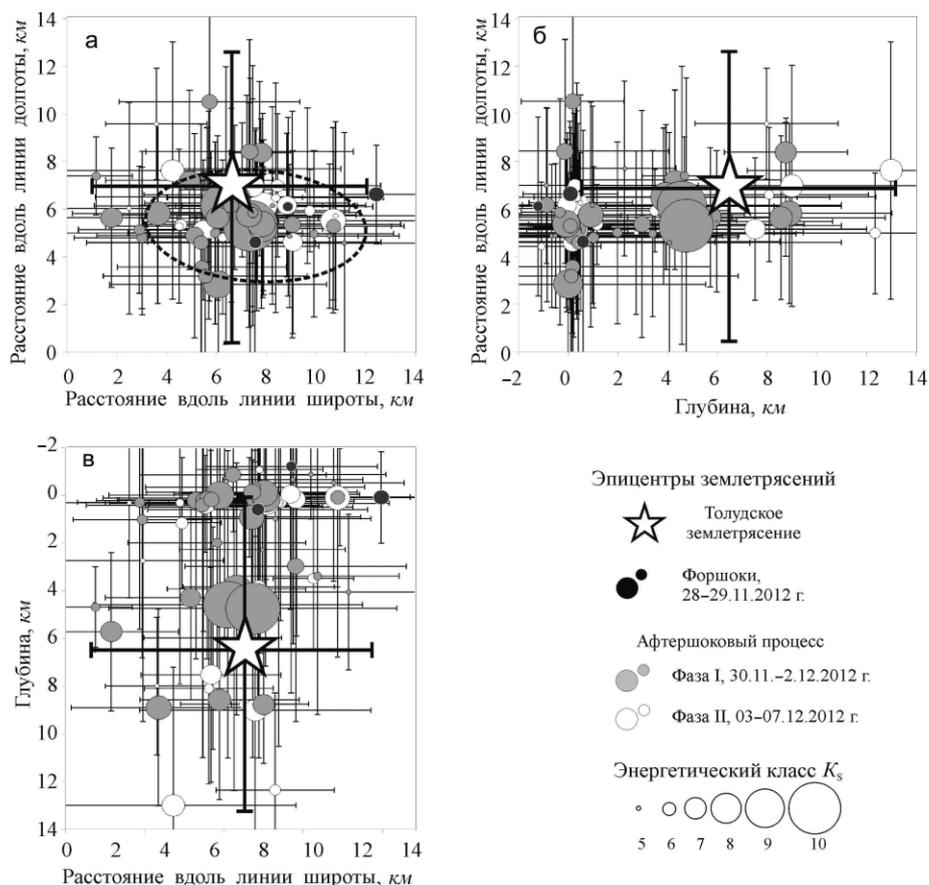


Рис. 10. Форшоки и афтершоки Толудского землетрясения: карта эпицентров (а) и вертикальные разрезы (б – субширотный, в – субмеридиональный). Эллипс оконтуривает 90% эпицентров. Цветовое разбиение отражает основные описанные в тексте фазы развития форшок-афтершокового процесса. Интервалы соответствуют невязкам определения координат землетрясений (интервалы для Толудского землетрясения выделены более жирной линией).

Оценка интенсивности сотрясений. ТЗ произошло в удаленном ненаселенном районе, обследование эпицентральной зоны не проводилось, поэтому нет сведений о его макросейсмическом проявлении. Однако есть возможность оценить балльность по инструментальным данным [20]. Воспользуемся шкалой сейсмической интенсивности [21], оценки интенсивности землетрясений по которой совпадают с оценками по шкалам MSK-64 [22] в пределах точности определений.

Сейсмические станции «Ключи»-KLY (пос. Ключи, $\Delta \sim 78$ км) и «Тумрок»-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/с^2 , 9.3 см/с^2 и 3.6 см/с^2 для станции KLY и 8.9 см/с^2 , 6.1 см/с^2 и 9.4 см/с^2 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 были использованы следующие параметры колебаний грунта: PGA, PGV, а также произведения $\text{PGA} \times \text{PGV}$ (мощность сейсмической волны) и $\text{PGA} \times t^{0.5}$ (интенсивность по Ариасу, где продолжительность колебаний $\tau = 5$ с по [21]):

$$I = 2.5 \lg(\text{PGA}) + 1.89, \quad (3)$$

$$I = 2.13 \lg(\text{PGV}) + 4.74, \quad (4)$$

$$I = 2.5 \lg(\text{PGA}) + 1.25 \lg \tau + 1.05, \quad (5)$$

$$I = 1.325 \lg(\text{PGA} \times \text{PGV}) + 2.83. \quad (6)$$

В соответствии с рекомендациями в [21], учитывались только максимальные значения для горизонтальной компоненты сейсмической записи. Средние арифметические значения PGA, PGV, $\text{PGA} \times t^{0.5}$, $\text{PGA} \times \text{PGV}$, соответствующие им значения балльности I и стандартного отклонения $\sigma(I)$, а также весовые функции f приведены в [21]. Для ТЗ оценка интенсивности колебаний, осредненная по указанным 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 [23] 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 для Камчатки из [21]:

$$I_0 = 1.5 M - 2.6 \lg h + 2.5. \quad (7)$$

В соответствии с этой формулой, для землетрясения с магнитудой $M \sim 5$ и глубиной гипоцентра $h \sim 6$ км I_0 составляет ~ 8 баллов.

Это же значение интенсивности может быть получено и при применении использованного ранее для поверхностных землетрясений Камчатки уравнения макросейсмического поля из [24]:

$$I_0 = 1.5 M - 2.63 \lg h - 0.0087 h + 2.5. \quad (8)$$

Учитывая, что ошибка δh определения глубины ТЗ равна ~ 6 км, интенсивность колебаний в его эпицентральной зоне равна $I_0^p = 7.9$ баллов при $h = 6$ км и могла быть $I_0^p = 7.1$ балла при глубине очага $h = 12$ км. Поэтому в названии статьи поставлено расчетное значение $I_0^p = 7-8$ баллов.

История сейсмичности Толудской эпицентральной зоны представлена сводной картой эпицентров с 01.01.1999 г. по 26.11.2012 г. (рис. 11), до начала ГТИ.

Как видим, наиболее сильные землетрясения этой части Ключевской группы вулканов регистрируются именно в Толудской эпицентральной зоне. В ходе БГТИ 1975–1976 гг. она тоже проявляла повышенную сейсмическую активность, которую предположительно рассматривают как результат латеральных перемещений магмы [3]. В ряде работ [4, 25, 26 и др.] предполагается связь Толудской эпицентральной зоны с магматической питающей системой Ключевской группы вулканов. Интересной особенностью Толудской зоны является достаточно

резкая западная граница облака эпицентров, согласующаяся по положению и простиранию с глубинным разломом (рифтом), пересекающим влк. Плоский Толбачик и Толбачинский дол. Толудское землетрясение 30 ноября 2012 г. с $K_S=11.3$ – сильнейшее инструментально зарегистрированное сейсмическое событие Толудской эпицентральной зоны.

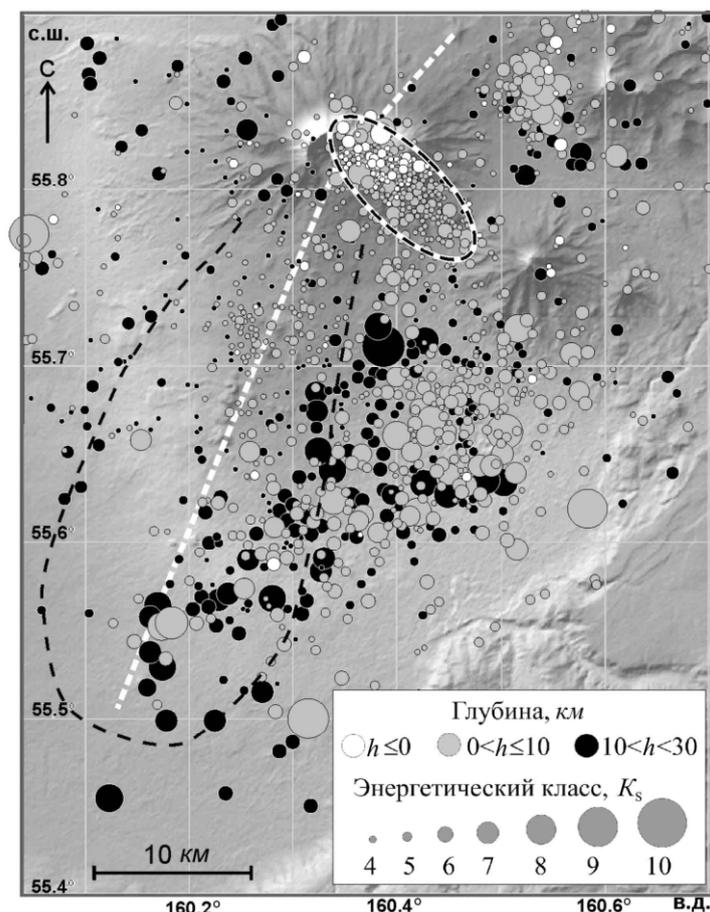


Рис. 11. Эпицентры мелкофокусных землетрясений юго-восточного сектора Ключевой группы вулканов с 01.01.1999 г. по 26.11.2012 г. (до начала ТТИ)

Эллипсом оконтурена область сейсмической активизации, предварявшей ТТИ в августе–ноябре 2012 г.; светлый пунктир – осевая линия зоны глубинного магмоподводящего разлома (рифта); черный пунктир – условная граница Толбачинского дола.

Заключение. Исследована серия Толудских землетрясений 28 ноября – 7 декабря 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 максимального афтершока с $M_L=4.3$) по сейсмическим записям определены скалярный сейсмический момент, механизм очага, моментная магнитуда M_w , глубина эквивалентного точечного источника, его длительность и размеры площадки разрыва. Проанализировано развитие афтершокового процесса Толудского землетрясения.

Интенсивность сотрясений в эпицентральной зоне Толудского землетрясения могла достигать $I_0 \sim 7-8$ баллов по шкале MSK-64, а в ближайших населенных пунктах, на расстоянии 50–80 км от эпицентра оценивается по инструментальным данным в $I_i=3-4$ балла.

В результате проделанной работы установлено:

- Толудская серия сейсмических событий является форшок-афтершоковым процессом Толудского землетрясения, а не обычным для вулканических областей сейсмическим роём;
- Толудское землетрясение произошло под действием напряжения растяжения, ориентированного вкрест глубинного магмоподводящего разлома (рифта), питающего голоценовые трещинные Толбачинские извержения;

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

– простираание одной из нодальных плоскостей этих очагов соответствует простираанию рифта, что позволило выбрать ее в качестве действующей плоскости разрыва.

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.

Толудское облако землетрясений еще раз продемонстрировало, что процессы, сопровождающие извержение, захватывают значительные пространственные области, не концентрируясь только в зоне эруптивных центров. Сопоставление с Большим трещинным Толбачинским извержением в 1975–1976 гг. 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.

Л и т е р а т у р а

1. Гордеев Е.И., Муравьев Я.Д., Самойленко С.Б., Вольнец А.О., Мельников Д.В., Двигало В.Н. Трещинное Толбачинское извержение 2012–2013 гг. Первые результаты // ДАН. – 2013. – 452. – № 5. – С. 562–566.
2. Сениюков С.Л., Нуждина И.Н. Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 449–465.
3. Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка) / Отв. ред. С.А. Федотов. – М.: Наука, 1984. – 637 с.
4. Ермаков В.А., Ермаков А.В. Геолого-петрологические модели извержения 1975–76 гг. на Толбачинском долу (Ключевская группа вулканов) // Геофизические исследования. – М.: ИФЗ РАН, 2006. – Вып. 5. – С. 53–115.
5. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 2. – С. 53–59.
6. International Seismological Centre, Thatcham, Berkshire, United Kingdom, 2015 [Сайт]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
7. Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сениюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 18–40.
8. Чебров Д.В., Матвеев Е.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В., Музуров Е.Л. (сост.). Сейсмические станции сети Камчатки и Командорских островов в 2012 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD_ROM.
9. Сениюков С.Л., Дрознина С.Я. (отв. сост.), Карпенко Е.А., Леднева Н.А., Назарова З.А., Кожевникова Т.Ю., Митюшкина С.В., Напылова Н.А., Раевская А.А., Ромашева Е.И. (сост.). Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2012 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD_ROM.
10. Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Напылова Н.А., Напылова О.А., Демянчук М.В., Соболевская О.В. (сост.). Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2012 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD_ROM.
11. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2012 год [Электронный ресурс] / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2012–2013. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2012
12. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 116 с.

13. **Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В.** Об аномалии сейсмического режима, предварявшей новое (2012 г.) трещинное Толбачинское извержение на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2012. – № 2. – Вып. 20. – С. 16–19.
14. **Кугаенко Ю.А., Титков Н.Н., Салтыков В.А., Воропаев 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.
15. **Ландер А.В.** Комплекс программ определения механизмов очагов землетрясений и их графического представления // Отчет «Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов в 2003 г.». – Фонды КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2004. – С. 359–380.
16. **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.
17. **Hanks T.C., Kanamori H.A.** Moment magnitude scale // J. of Geophys. Res. – 1979. – **84**. – № B5. – P. 2348–2350.
18. **Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R.** Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes // Geophys. J. Int. – 1995. – **122**. – № 1. – P. 108–124.
19. **Гусев А.А., Мельникова В.Н.** Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 6. – С. 55–63.
20. **Аптикаев Ф.Ф.** Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. – М.: Наука и образование, 2012. – 176 с.
21. **Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности.** ГОСТ-Р. Проект, 2-я редакция. – М.: Стандартинформ, 2015. – 32 с.
22. **Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага).** Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
23. **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.
24. **Федотов С.А., Шумилина Л.С.** Сейсмическая сотрясаемость Камчатки // Физика Земли. – 1971. – № 9. – С. 3–15.
25. **Belousov A., Belousova M., Edwards B., Volynets A., Melnikov D.** Overview of the precursors and dynamics of the 2012–13 basaltic fissure eruption of Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia // J. Volcanol. Geotherm. Res. – 2015. – **307**. – P. 22–38.
26. **Koulakov I., Abkadyrov I., Arifi N., Deev E., Droznina S., Gordeev E., Jakovlev A., Khrepy S., Kulakov R., Kugaenko Yu., Novgorodova A., Senyukov S., Shapiro N., Stupina T., West M.** Three different types of plumbing systems beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny and Klyuchevskoy in Kamchatka // J. Geophys. Res. Solid Earth. – 2017. – **122**. – Is. 5. – P. 3852–3874.