

ТОЛУДСКАЯ СЕРИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 28.11.-6.12 2012 г., СОПРОВОЖДАВШАЯ НАЧАЛО ТРЕЩИННОГО ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ

Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Иванова Е.И., Павлов В.М., Салтыков В.А.

Камчатский филиал ГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Рассматривается Толудское облако землетрясений (ТОЗ) – серия мелкофокусных сейсмических событий, которая зафиксирована в юго-западном секторе Ключевской группы вулканов, в районе долины реки Толуд, и по времени совпадает с начальной фазой Трещинного Толбачинского извержения 2012-2013 гг. (ТТИ) (рис. 1).

Эпицентры ТОЗ образуют компактную группу размером $\sim 5 \times 10$ км, вытянутую субширотно, в 20 км к югу от вулкана Плоский Толбачик. Глубина землетрясений в основном не превышает 10 км. Ошибка определения положения землетрясений ТОЗ составляет 4 ± 1 км по эпицентру и 5 ± 2 км по глубине. Пространственно этот кластер сейсмических событий не связан ни с предварявшей извержение сейсмической активизацией, ни с областью землетрясений эруптивной зоны. С 28.11.2012 г. по 7.12.2012 г. было локализовано около 70 сейсмических событий с $K_S = 5.2-11.3$, $\Sigma E \sim 2.1 \cdot 10^{11}$ Дж. Энергия ТОЗ в ~ 50 раз превышает сейсмическую энергию, выделившуюся в 2012 г. в районе вулкана Плоский Толбачик как при подготовке, так и непосредственно в ходе ТТИ.

ТОЗ тяготеет к восточному краю протяженного рифта ССЗ простирания, проходящего через вершину вулкана Плоский Толбачик и зону моногенных вулканов Толбачинского Дола и питающего эруптивные центры голоценовых извержений (рис. 1).

Толудское землетрясение (ТЗ) с $K_S = 11.3$ ($M_L = 4.9$, $M_C = 5.4$), которое произошло 30.11.2012 г. в 11:00 UTC на глубине 6 км, входит в число пяти сильнейших сейсмических событий с $K_S > 11.0$, зарегистрированных на глубине до 10 км под всей Ключевской группой вулканов за годы детальных сейсмологических наблюдений (1961-2012 гг.). 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.

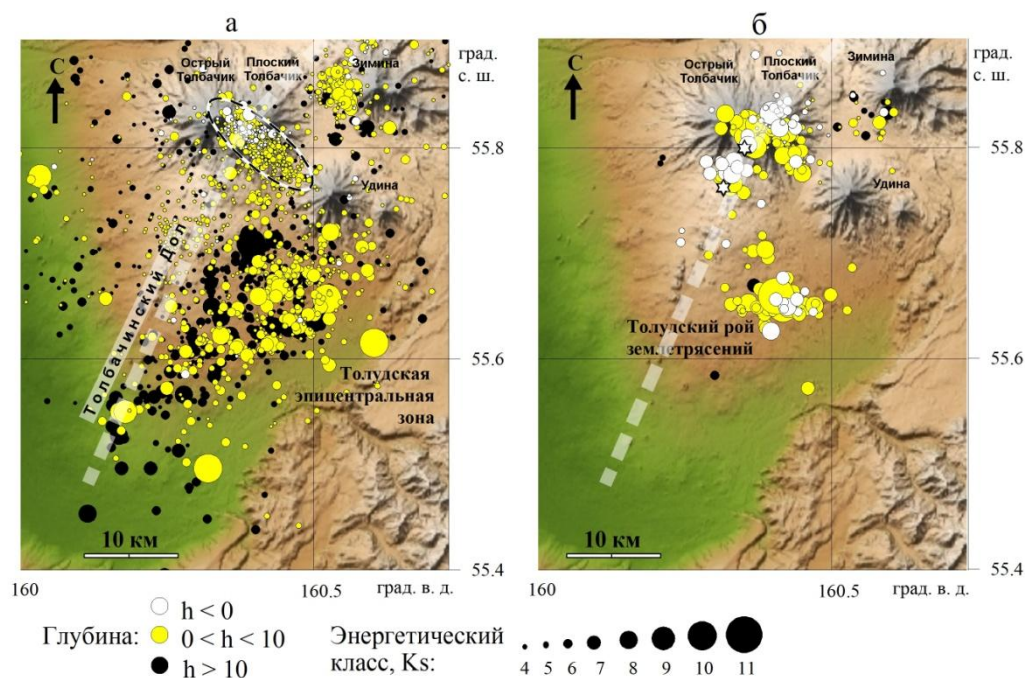


Рис. 1. Эпицентры землетрясений Толбачинской вулканической зоны. а – с 01.01.1999 г. по 26.11.2012 г., до начала ТТИ. б – сейсмичность, сопровождавшая первые недели извержения, с 27.11.2012 г. по 01.01.2013 г. На схему нанесены основные эруптивные центры извержения (звезды). Эллипсом выделена область сейсмической активизации, предварявшей ТТИ в августе-ноябре 2012 г. Пунктир – осевая линия зоны глубинного разлома (рифта), питающего Толбачинские извержения.

Таблица 1. Значение базовых параметров Толудского землетрясения (ТЗ) и его сильнейшего афтершока (АТЗ) по каталогу КФ ГС РАН

Код	Дата/Время ¹⁾ дд.мм.гггг/чч:мм:сс	Положение гипоцентра ²⁾ φ (°), λ (°), h (км)			K_S	M_l / M_C
		φ (°)	λ (°)	h (км)		
ТЗ	30.11.2012 / 11:00:31.3	55.66	160.41	6±6	11.3	4.9 / 5.4
АТЗ	30.11.2012 / 12:49:33.1	55.65	160.42	5±6	10.0	4.3 / 4.6

¹⁾ Точность определения времени в очаге составляет 0.3 с для обоих событий.

²⁾ Точность определения эпицентра составляет 6 км для обоих событий.

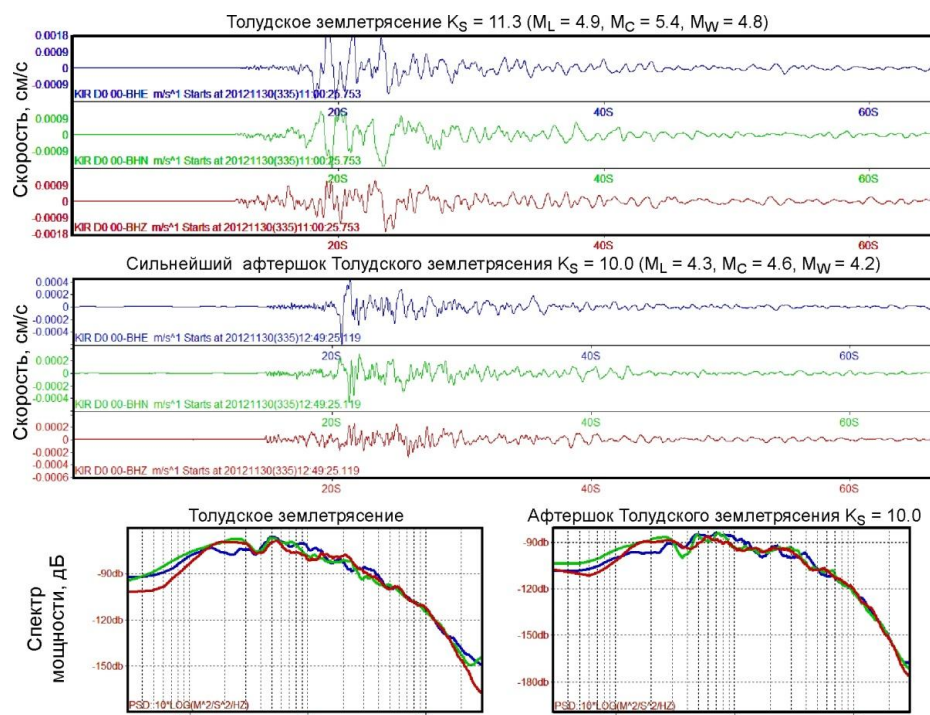


Рис. 2. Примеры записей Толудского землетрясения и его сильнейшего афтершока широкополосной станцией «Киришев» (KIR, каналы ВН) на эпицентральной расстоянии $\Delta \sim 34$ км.

Три наиболее сильных землетрясения ТОЗ с $K_S = 11.3$, $K_S = 9.6$ и $K_S = 10.0$ произошли 30 ноября 2012 г. в течение около двух часов в диапазоне глубин 4.5–6.5 км. Следует отметить три слабых землетрясений, зафиксированных 28-29.11.2012 г. перед ТЗ, которые, вероятно, следует рассматривать как форшоки. Анализ ТОЗ показал, что после ТЗ в течение ~ 3 суток наблюдалась афтершоковая последовательность землетрясений (рис. 3), интенсивность которой убывала по гиперболическому закону (закону Омори с параметром $p=1$). Эта фаза сменилась вспышкой слабой сейсмичности 3-5.12.2012, которая имела характер роя: в рое отмечается отсутствие землетрясения, существенно превышающего другие по энергии, и практически постоянная скорость сейсмического потока.

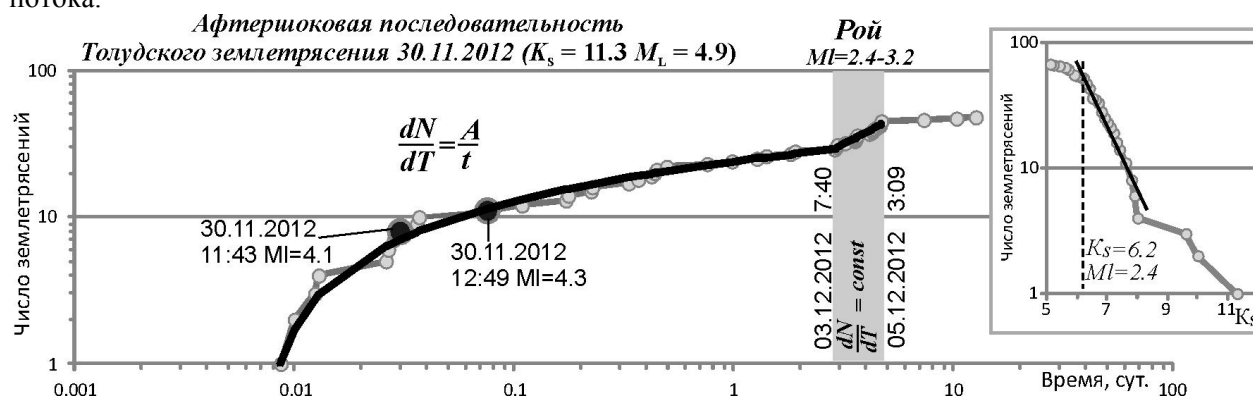


Рис. 3. Характерные фазы развития афтершокового процесса Толудского землетрясения. За начало отсчета взято время основного события. Отмечены временные границы выделенных фаз (афтершоковой последовательности и роя). На графике выделены два сильнейших афтершока. На врезке представлен кумулятивный график повторяемости для Толудского облака землетрясений, уровень представительной регистрации (в условиях интенсивного вулканического дрожания на начальной стадии ТТИ) определен как $K_S=6.2$.

Для ТЗ и АТЗ построены механизмы их очагов двумя способами: (1) по знакам первых вступлений объемных волн по программе [4] и (2) по широкополосным цифровым сейсмограммам путем расчета тензора сейсмического момента. В первом случае использованы записи указанных землетрясений на камчатских региональных станциях и на станциях мировых сетей, всего в расчетах участвовала 51 станция. Во втором случае использовались записи камчатских широкополосных сейсмических станций (см. врезки на рис. 4, 6) и дополнительно оценивались глубина эквивалентного точечного источника, его длительность, магнитуда по объемным волнам M_w и радиус площадки разрыва. Результаты расчетов представлены в таблице 2. Характеристики широкополосных станций камчатской системы сейсмического мониторинга приведены в [6].

Расчет механизма с использованием широкополосных сейсмограмм смещений. Механизм определяет тензорную структуру двойного диполя без момента (ДДБМ). А скалярный сейсмический момент задает амплитуду ДДБМ. ДДБМ является частным случаем тензора сейсмического момента (ТСМ). ТСМ рассчитывается по сейсмограммам с применением линейной инверсии. ДДБМ может быть оценен по ТСМ, либо непосредственно по сейсмограммам. В последнем случае применяется нелинейная инверсия. Методика расчета ТСМ и ДДБМ опубликована в статье [5]. Методика развита в рамках традиционного подхода, который заключается в выборе наилучшего двойного диполя без момента на основе минимизации невязки – отклонения синтетических сейсмограмм от наблюдаемых.

$$\text{Невязка } \sigma \text{ рассчитывается по формуле } \sigma = \frac{\sum_{i=1}^N (U_i^{obs} - U_i^{synt})^2}{\sum_{i=1}^N (U_i^{obs})^2}, \text{ где}$$

U_i^{obs} – отсчеты (фильтрованных) реальных волновых форм смещений, принятых в расчет;

U_i^{synt} – отсчеты (фильтрованных) синтетических волновых форм смещений, вычисленных по рассчитанному тензору сейсмического момента (**М**), и соответствующих элементарных синтетических сейсмограмм (**Е**):

$$U_i^{synt} = M_{11}E_i^{11} + M_{12}E_i^{12} + M_{13}E_i^{13} + M_{22}E_i^{22} + M_{23}E_i^{23} + M_{33}E_i^{33}.$$

В приведенной формуле для невязки индекс i пробегает все отсчеты, включенные в подгонку, по всем станциям и всем компонентам. Учитывая, что шаг по времени равен 1, из рисунков сравнения наблюдаемых и синтезированных волновых форм следует, что полное число отсчетов, включенных в подгонку равно 2571 для основного толчка и 2421 – для афтершока.

Результаты инверсии широкополосных смещений в двойной диполь без момента и сопоставление волновых форм наблюдаемых смещений и синтетических смещений, рассчитанных для оптимального механизма, показаны на рис. 4-7.

Оценка размера площадки разрыва. Сначала оценим площадь разрыва на основе корреляционной зависимости $S=10^{(M_w - 4.1)}$, в соответствии с работой [2]. Затем, предполагая, что площадка разрыва – круг радиуса R , получим $R=(S/\pi)^{1/2}$. Для основного толчка $M_w=4.8$, и для радиуса получим значение $R_M=1.3$ км; для афтершока $M_w=4.2$, и $R_A=0.6$ км (таблица 2).

Механизмы очага ТЗ и АТЗ, рассчитанные двумя независимыми методами, хорошо согласуются между собой (таблица 2). Землетрясения возникли под действием преобладающего по величине напряжения растяжения, ориентированного субширотно. По обеим нодальным плоскостям зафиксированы сбросы со сдвиговой компонентой. В соответствии с особенностям тектоники Толбачинской вулканической зоны (рифт ССЗ простирается) в качестве плоскости разрыва предпочтение отдается субмеридиональной нодальной плоскости ССЗ простирается, параметры которой выделены жирным шрифтом в таблице 2.

Отметим, что представлен первый пример использования широкополосных 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 примененная здесь технология позволяет проводить аналогичные расчеты механизмов очагов и моментной магнитуды для наиболее сильных вулкано-тектонических землетрясений из указанного района.

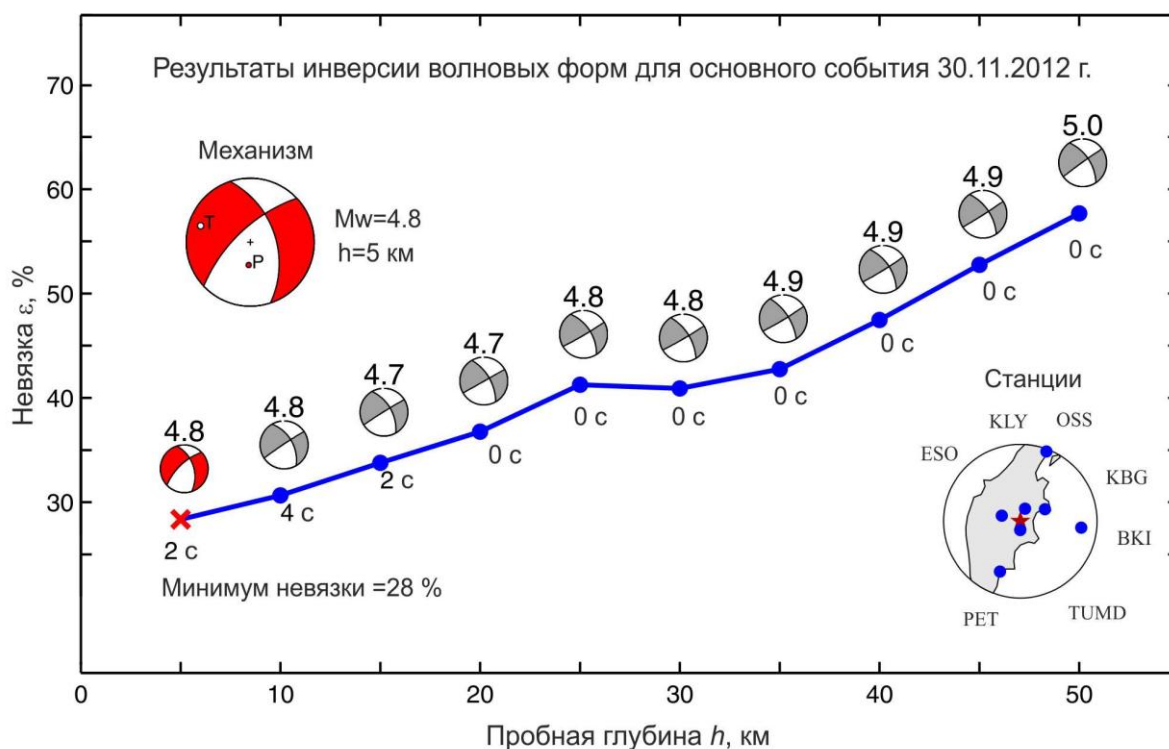


Рис. 4. Результаты инверсии широкополосных смещений в двойной диполь без момента для основного события 30.11.2012 г. Временная функция источника (ВФИ) – симметричный треугольник. Показана зависимость остаточной невязки от пробной глубины, соответствующий механизм, значение моментной магнитуды и длительность ВФИ. В левом верхнем углу – наилучший механизм (при глубине 5 км). В правом нижнем углу – положение использованных станций. На этом и других рисунках механизмы даны в стереографической проекции нижней полусферы.

Сравнение волновых форм реальных и синтетических сейсмограмм для основного толчка 30.11.2012 г.

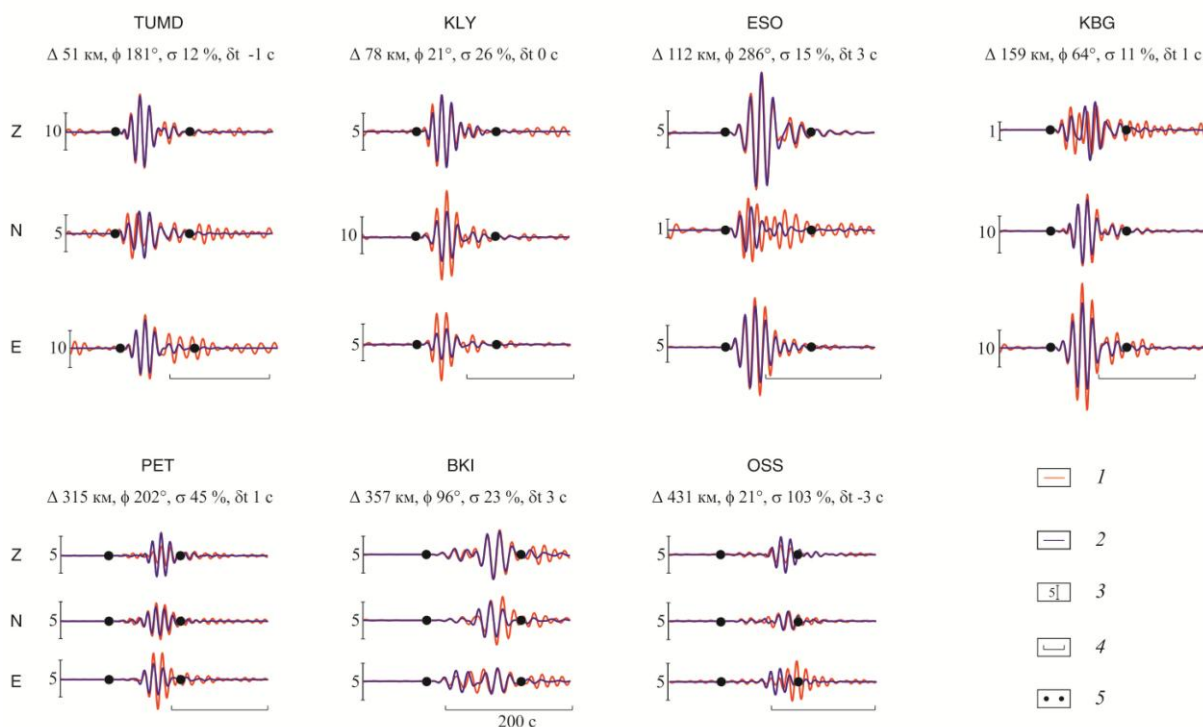


Рис. 5. Сопоставление волновых форм наблюдаемых (1) смещений и синтетических (2) смещений, рассчитанных для оптимального механизма основного толчка 30.11.2012 г. для глубины 5 км. Приведен масштаб амплитуд (3) в единицах 10^{-4} см. Для каждой станции указан интервал в 200 секунд (4). Точками (5) отмечены концы интервала подгонки. Сейсмограммы фильтрованы в полосе периодов 16-25 секунд.

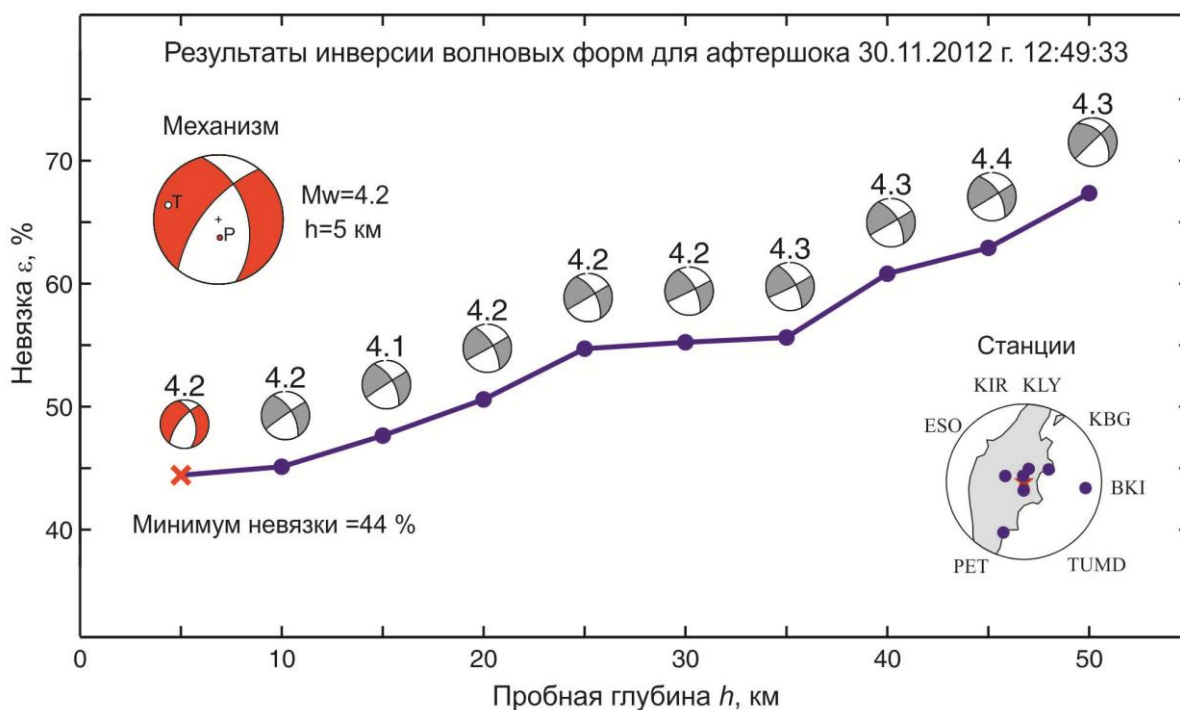


Рис. 6. Результаты инверсии широкополосных смещений в двойной диполь без момента для афтершока 30.11.2012 г. 12:49:33. Временная функция источника – дельта-функция («мгновенный импульс»). Показана зависимость остаточной невязки от пробной глубины, соответствующий механизм и значение моментной магнитуды. В левом верхнем углу – наилучший механизм (при глубине 5 км). В правом нижнем углу – положение использованных станций.

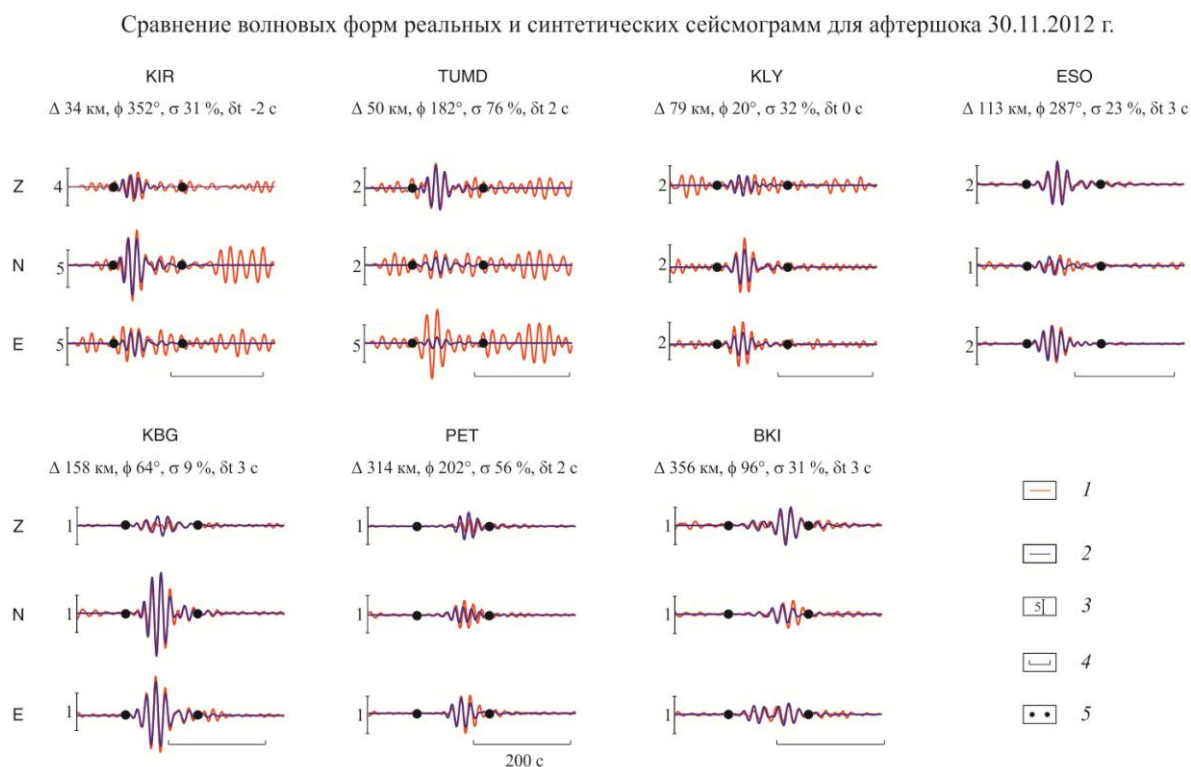


Рис. 7. Сопоставление волновых форм наблюдаемых (1) смещений и синтетических (2) смещений, рассчитанных для оптимального механизма основного толчка 30.11.2012 г. для глубины 5 км. Приведен масштаб амплитуд (3) в единицах 10^{-4} см. Для каждой станции указан интервал в 200 секунд (4). Точками (5) отмечены концы интервала подгонки.

Таблица 2. Механизмы, значения остаточной невязки σ , скалярного сейсмического момента и моментной магнитуды Толбачинских землетрясений 30.11.2012 г.

магнитуды. Глобальная сейсмическая сеть 30.11.2012 г.

Код	Механизм				σ , %	M_0 10^{15} Нм	M_w	R_A км
	Плоскости ¹⁾		Угол ²⁾					
	φ (°)	δ (°)	λ_s (°)					
	По широкополосным сейсмограммам (для глубины 5 км)							
ТЗ	342 / 227	47 / 66	-146 / -49		28	19.1	4.8	1.3
АТЗ	345 / 219	41 / 63	-136 / -58		44	2.9	4.2	0.6
	По знакам первых вступлений (для глубины 6 км)							
ТЗ	351 / 221	51 / 51	-126 / -53					
АТЗ	20 / 174	28 / 63	-67 / -102					

¹⁾ Ориентация плоскости задается двумя углами – азимутом простираения φ_s и углом падения δ (угол для второй плоскости дан после косой черты). ²⁾ Угол подвижки λ_s – угол в плоскости очага между направлением простираения и вектором подвижки (отсчитывается от направления простираения против часовой стрелки).

ТЗ произошло в ненаселенном районе, поэтому нет сведений о его макросейсмическом проявлении, однако, учитывая магнитуду и малую глубину, по известным эмпирическим соотношениям можно оценить балльность в эпицентральной зоне: около 7 баллов по шкале MSK-64.

Анализ афтершокового процесса показал, что ТОЗ не является роем землетрясений. В целом ТОЗ может рассматриваться как предварявшееся единичными форшоками сильное ТЗ, его затухающий афтершоковый процесс и фаза роевого характера, завершившая эту серию сейсмических событий (рис. 3).

Совпадение по времени ТОЗ с первыми днями ТТИ представляется неслучайным. Аналогичная ситуация наблюдалась в 1975 г.: сейсмическая активизация района долины реки Толуд сопровождала Большое трещинное Толбачинское извержение [1]. Тогда сейсмичность связывалась с глубинным перемещением магмы из-под постройки вулкана Плоский Толбачик в южном направлении вдоль структур рифта. Возможно, скрытая миграция магмы имела место и в 2012 г. В этом случае ТОЗ может иллюстрировать образование интрузии, удаленной от места основного извержения (возможный несостоявшийся Южный прорыв ТТИ). Однако не исключена и тектоническая природа землетрясений как результата перераспределения поля напряжений в ходе деформаций, возникших при подготовке ТТИ и интенсивном излиянии магмы 27-29.11.2012 г. в начальной фазе извержения [3].

Список литературы:

1. Большое трещинное Толбачинское извержение. М.:Наука, 1984. 637 с.
2. Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55-63.
3. Кугаенко Ю.А., Титков Н.Н., Салтыков В.А., Воробаев 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.
4. Ландер А.В. Комплекс программ определения механизмов очагов землетрясений и их графического представления // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов в 2003 г. Отчет КОМСП ГС РАН.
5. 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.
6. Сильные камчатские землетрясения 2013 г. Петропавловск-Камчатский: «Новая книга», 2014 г. 252 с.