

**МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ АФТЕРШОКОВ ОЛЮТОРСКОГО
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 20 апреля 2006 г. с $M_w=7.6$**

А.В. Ландер¹, В.И. Левина²

¹Международный Институт теории прогноза землетрясений и
математической геофизики РАН, Москва, land@mitp.ru

²Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, vlr.levina@gmail.com

Олюторское землетрясение 20 апреля 2006 г. с магнитудой $M_w=7.6$ произошло на юге Корякского нагорья (рис. 1) в труднодоступном и малоизученном районе Корякского автономного округа [1]. Практически вся сеть сейсмических станций Камчатского филиала ГС РАН, данные которой используются в рутинной обработке камчатских землетрясений, расположена довольно далеко на юг от очаговой зоны землетрясения (рис. 1). Единственная станция сети «Каменское» KAMR находится в 175 км к северо-западу от главного события. Другая ближайшая станция – «Оссора» (OSSR) – находится в 300 км к юго-западу. При таком расположении станций довольно трудно получить достоверное определение положения гипоцентра. В связи с этим для локации землетрясений привлекались данные сети Магаданского филиала ГС РАН (станции «Сеймчан» SEY, «Эвенск» EVN, «Магадан» MA2, «Билибино» BILL). Кроме того, 2–18 мая в эпицентральной зоне работали три автономные сейсмические станции «Mars» производства Германии с магнитооптическим регистратором и сейсмометром LE-3D [2], принадлежащие Институту вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Основные параметры и технические характеристики станций приведены в табл. 1 и 2. Параметры постоянных станций Камчатской региональной сети приведены в [3].

Карта расположения сейсмических станций, данные которых участвовали в обработке, приведена на рис. 1.

Таблица 1. Временные сейсмические станции, работавшие в 2006 г. в эпицентральной зоне Олюторского землетрясения

№	Станция		Время работы		Координаты		Тип ЦСС
	Название	Код	Начало	Конец	φ°, N	λ°, E	
1	Тиличики	ST01	02.05. 10.05.	08.05. 25.08.	60.430	166.056	Mars
2	Хаилино	ST02	02.05.	11.05.	60.959	166.854	Mars
3	Ледяная	ST03	03.05.	17.05.	60.983	166.225	Mars

Таблица 2. Данные об аппаратуре временных цифровых станций Корякского нагорья в 2006 г.

Название станции	Тип датчика	Перечень каналов	Частотный диапазон, Гц	Частота опроса данных, Гц	Эффективная разрядность АЦП	Чувствительность, велосиметр – отсчет/(м/с)
Тиличики	LE-3D	(N, E, Z) v	1–10	100	24	10^8-10^9
Хаилино	LE-3D	(N, E, Z) v	1–10	100	24	10^8-10^9
Ледяная	LE-3D	(N, E, Z) v	1–10	100	24	10^8-10^9

Положение гипоцентров определялось по методике [5], используемой в текущей обработке землетрясений КФ ГС РАН, где методом наименьших квадратов находится минимум функции невязок времен первых вступлений объемных волн на всех станциях сети по скоростной модели среды И.П. Кузина и С.А. Федотова [6]. Скоростная модель среды рассчитана для гипоцентров, расположенных в фокальной зоне Камчатки, что соответствует подавляющему

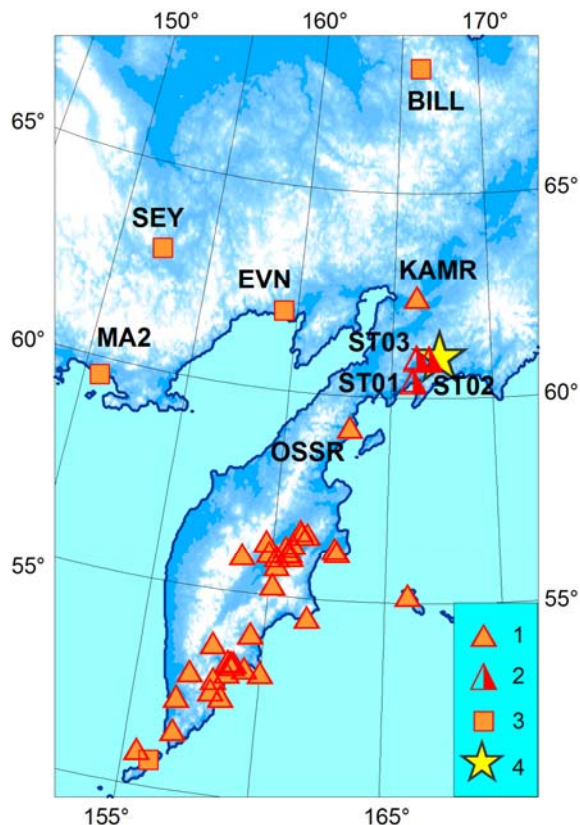


Рис. 1. Сеть сейсмических станций КФ ГС РАН

1, 2 – постоянная и временная станция КФ ГС РАН соответственно; 3 – станция Магаданского филиала ГС РАН; 4 – инструментальный эпицентр Олюторского землетрясения из [4].

большинству событий, регистрируемых Камчатской региональной сетью. Однако гипоцентры Олюторских афтершоков располагаются на малых глубинах в пределах континентальной коры. Поэтому волновая картина на важнейших ближайших к эпицентру станциях может существенно отличаться от типичных камчатских записей, и годограф, рассчитанный для океанической коры, может не дать удовлетворительных результатов. Более того, оказалось, что и на расстояниях свыше 500 км реальные времена пробега могут значительно отличаться от стандартного годографа.

Уже первые выборочные оценки гипоцентров афтершоков продемонстрировали, что существует систематическое смещение к востоку камчатских определений эпицентров относительно данных мировой сети, полученных в Национальном центре информации о землетрясениях США (NEIC) [7]. На рис. 2 а показаны эпицентры наиболее сильных афтершоков Олюторского землетрясения, определенные по данным мировой сети и по данным КФ ГС РАН. Для всех камчатских эпицентров наблюдается систематическое смещение на восток. Меньшие, но также устойчивые смещения наблюдались для гипоцентров, в определении которых участвовали временные станции, располагавшиеся в эпицентральной зоне. Аналогичная картина наблюдается и для более представительного набора данных. На рис. 2 б показана сглаженная гистограмма смещений

камчатских определений относительно эпицентров NEIC по 232 афтершокам апреля-мая 2006 г., где хорошо видно, что камчатские эпицентры смещены на восток в среднем на 20 км.

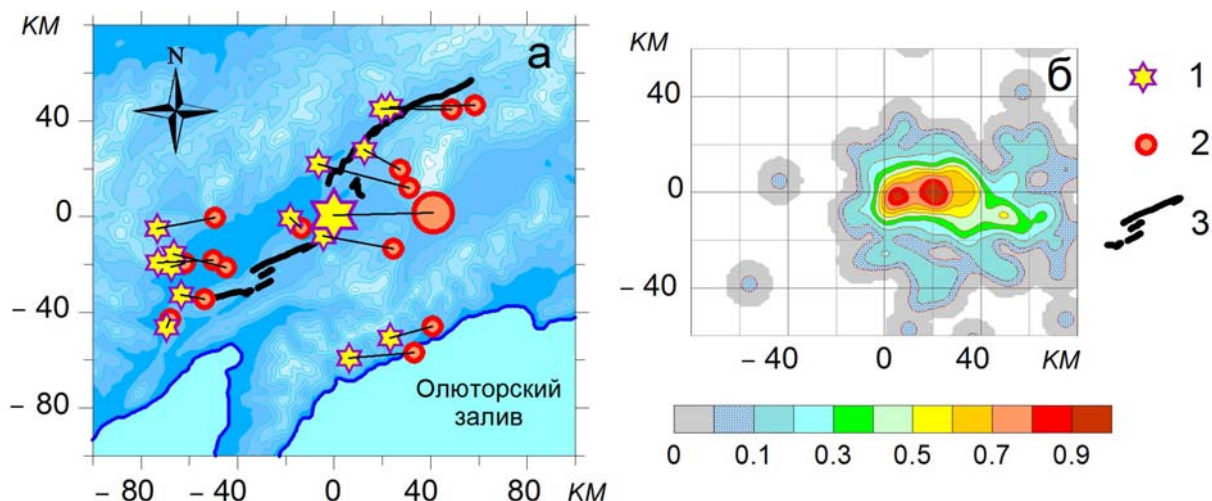


Рис. 2. Карта эпицентров 15 сильнейших землетрясений Олюторской очаговой зоны, определенных разными сетями (а), и сглаженная гистограмма относительных смещений эпицентров, определенных NEIC и Камчатской региональной сетью с использованием стандартного годографа (б)

1, 2 – решение эпицентра NEIC [7] и Камчатской сети [8], соответствующие эпицентры соединены тонкими линиями (главное землетрясение выделено крупной звездой); 3 – сейсморазрывы главного землетрясения по [9, 10]. Гистограмма (б) построена в координатах, соответствующих карте (а), и нормирована на максимум.

Дополнительные расчеты позволяют предположить, что преобладающей причиной различий в оценках эпицентров являются неточности камчатских определений. На рис. 3 приведена типичная карта неопределенности камчатского решения для эпицентра одного из афтершоков, из которого следует, что при существующей геометрии расположения станций Камчатской сети относительно Олюторского очага решения обладают большей неопределенностью именно по долготе.

Для объяснения восточного смещения оценок эпицентров были рассчитаны невязки на станциях Камчатки относительно гипоцентров из каталога NEIC. Полученная карта (рис. 4) качественно соответствует имеющимся представлениям о неоднородностях скоростей распространения волн в Камчатском регионе. Для трасс, захватывающих значительные участки океанической литосферы, характерны повышенные скорости распространения волн, а для районов неогеновых и современных вулканических поясов – заниженные. Совокупность используемых трасс охватывает всю зону перехода от океанических к островодужным областям. Это приводит, по-видимому, к закономерной азимутальной зависимости истинного годографа первых вступлений, и, как следствие, к восточному смещению оценок эпицентров при использовании единого стандартного годографа.

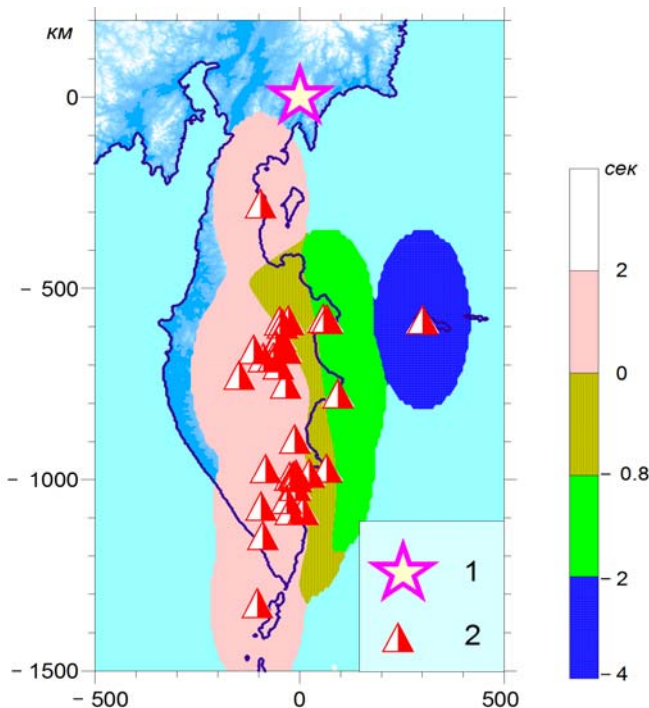


Рис. 4. Сглаженная по 37 афтершокам карта средних невязок времен вступлений на станциях Камчатской сети, рассчитанных с использованием стандартного годографа, относительно гипоцентров, определенных NEIC

1 – эпицентр Олюторского землетрясения; 2 – станция Камчатской региональной сети.

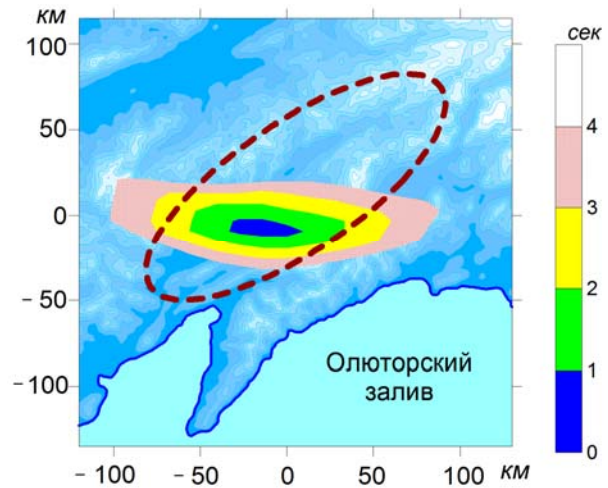


Рис. 3. Изолинии абсолютного значения максимальной невязки времени вступления P -волн в зависимости от положения эпицентра афтершока, зарегистрированного на восьми станциях

Пунктирный эллипс аппроксимирует форму и размеры очаговой области Олюторского землетрясения из [4].

Введение в годографы стационарных поправок, компенсирующих невязки, изображенные на рис. 4, позволяет сблизить решения Камчатской сети и NEIC. Однако такая процедура не может быть принята как окончательная. Оценки NEIC, по-видимому, также обладают небольшим систематическим смещением. На рис. 2 видно, что в юго-восточной части очаговой зоны большинство эпицентров NEIC располагаются северо-западнее поверхностных сейсморазрывов, появившихся после землетрясения. Полевые наблюдения [9, 10] в сочетании с механизмом очага главного толчка, полученным из тензора сейсмического момента [11], достаточно надежно указывают на то, что плоскость основного разрыва падает на юго-восток. Большинство же сильнейших афтершоков, согласно определениям NEIC, оказываются расположенными в стороне от основного разрыва, что маловероятно.

Поэтому для уточнения поправок к годографам P - и S -волн на станциях Камчатской сети были использованы также данные локальных временных

станций, располагавшихся 2–18 мая в пределах эпицентральной зоны. Было отобрано 31 землетрясение, для которых имелись данные трех локальных станций, а времена вступлений на станциях Камчатской сети заведомо не содержали грубых ошибок в идентификации фаз. К этим землетрясениям был применен специально разработанный вариант методики совместного переопределения гипоцентров и станционных поправок (JHD) [12–15]. Найденные поправки оказались близкими к таковым, полученным по смещениям региональных определений относительно NEIC, и были включены в стандартные программы расчета времен пробега волн. В дальнейшем они использовались для определения гипоцентров всех землетрясений, произошедших в очаговой зоне Олюторского землетрясения. Эффективность введения станционных поправок к годографам показана на гистограммах рис. 5, где на фрагменте (а) приведена сглаженная гистограмма смещений «исправленных» эпицентров, полученных после введения поправок к временам пробега, относительно «старых» эпицентров, определенных по стандартной методике. Гистограмма построена по всем афтершокам, для которых отсутствуют данные стационарных станций. На рис. 5 б приведена гистограмма результирующих смещений эпицентров NEIC относительно соответствующих определений Камчатской сети с учетом поправок. В среднем это смещение составляет около 10 км на запад. Пространственное распределение сильнейших афтершоков, полученное после введения поправок, показано на рис. 6. Отметим, что «исправленные» эпицентры концентрируются значительно ближе к сейсморазрывам, чем исходные определения на рис. 2 а.

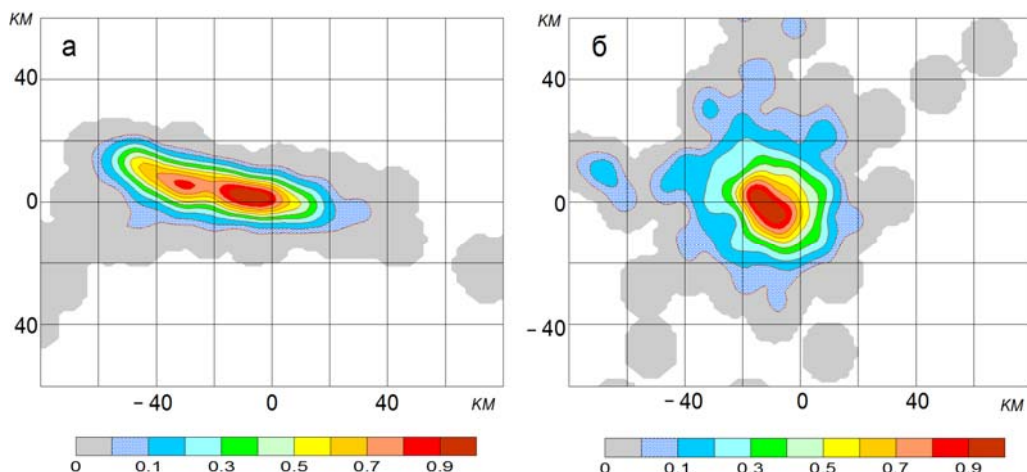


Рис. 5. Сглаженные гистограммы смещений исправленных эпицентров относительно исходных определений (а) и смещений эпицентров NEIC относительно исправленных камчатских определений (б)

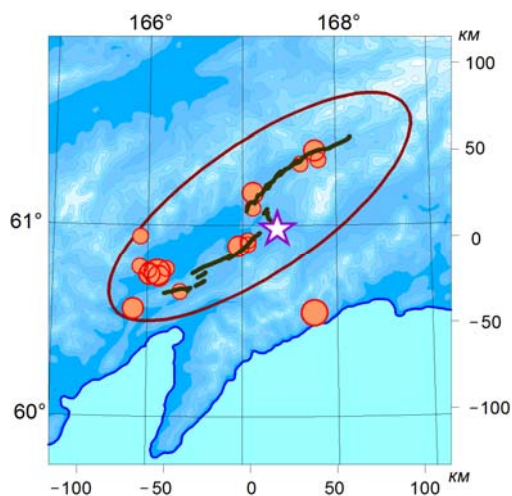


Рис. 6. Карта эпицентров наиболее сильных событий Олюторской эпицентральной зоны после введения поправок к стандартному годографу

Рис. 5 а построен по 619 афтершокам апреля-мая 2006 г. из каталога [8]; рис. 5 б – по 232 афтершокам апреля-мая 2006 г., имеющимся в каталогах [7, 8]. Обе гистограммы построены в координатах, соответствующих рис. 2, а и каждая нормирована на свой максимум.

Энергетические оценки землетрясений Олюторского очага также несколько отличаются от рутинных, принятых для землетрясений Камчатки и Командорских островов [16]. Поскольку за все время детальных наблюдений в Корякском нагорье не было зарегистрировано достаточного числа землетрясений, станционные поправки к энергетическим классам для этого региона отсутствовали. По набору землетрясений, полученному в ходе обработки афтершоков, были определены станционные поправки к энергетическому классу K_S . Значения поправок и более

подробная информация об энергетических оценках землетрясений Олюторского очага приведены в [17]. Помимо класса K_S по S -волнам для оценок величины землетрясений используется класс K_c [18] и магнитуда M_c [19] по кода-волнам.

Л и т е р а т у р а

1. **Олюторское землетрясение 20(21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований /** Отв. ред. В.Н. Чебров. – Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. – 290 с.
2. **Чебров В.Н., Сениуков С.Л.** Сейсмологические наблюдения на территории Корякского автономного округа, оперативная обработка Олюторского землетрясения 20 (21) апреля 2006 г. $M_w=7.6$ и его афтершоков // Олюторское землетрясение 20(21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. – С. 7–13.
3. **Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Иванова Е.И., Чеброва А.Ю., Левина В.И., Ландер А.В., Чебров В.Н., Гусева Е.М.** Камчатка и Командорские острова. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
4. **Левина В.И., Ландер А.В., Иванова Е.И., Митюшкина С.В., Титков Н.Н.** Олюторское землетрясение 20 апреля 2006 г. с $M_w=7.6$, $K_S=15.7$, $I_0=9-10$ (Корякское нагорье). (См. раздел III (Сильные и ощутимые землетрясения) в наст. сб.).
5. **Гусев А.А.** Определение гипоцентров близких землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. – 1979. – № 1. – С. 74–81.
6. **Кузин И.П.** Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. – М.: Наука, 1974. – 145 с.
7. **National Earthquake Information Centre.** – [http://neic.usgs.gov/neis/epic.html](http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html)
8. **Левина В.И., Шевченко Н.А. (отв. сост.), Бахтиарова Г.М., Карпенко Е.А., Кривогорницына Т.М., Ландер А.В., Леднева Н.А., Лепская Т.С., Митюшкина С.В., Пархоменко С.А., Пилипенко Л.В., Раевская А.А.** Каталог афтершоков Олюторского землетрясения 20.04.2006 г. с $M_w=7.6$ ($N=2911$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
9. **Пинегина Т.К.** Сейсмические деформации в эпицентральной зоне Олюторского землетрясения // Олюторское землетрясение 20(21) апреля 2006 г., Корякское нагорье. Первые результаты исследований. – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. – С. 126–169.
10. **Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Новиков С.С., Пинегина Т.К.** Олюторское землетрясение в Корякии 20(21) апреля 2006 г.: результаты геологического и макросейсмического изучения эпицентральной области // Олюторское землетрясение 20(21) апреля 2006 г., Корякское нагорье. Первые результаты исследований. – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. – С. 170–206.
11. **Harvard CMT catalog.** – <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> .
12. **Douglas A.** Joint epicentre determination // Nature. – 1967. – N 215. – P. 47–48.
13. **Pavlis G.L., Booker J.R.** Progressive multiple event location (PMEL) // Bull. Seism. Soc. Am. – 1983. – 73. – N 73. – P. 1753–1777.
14. **Pujol J.** Comments on the Joint Determination of Hypocenters and Station Corrections // Bull. Seism. Soc. Am. – 1988. – N 78. – P. 1179–1189.
15. **Pujol J.** Joint hypocenter location in media with lateral velocity variations and interpretation of the station corrections // Phys. Earth Planet. Inter. – 1992. – N 75. – P. 7–24.
16. **Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
17. **Левина В.И., Ландер А.В.** Определение основных параметров землетрясений Камчатки и Командорских островов в 2005–2006 гг. по данным окончательной обработки землетрясений. Окончательный каталог за 2005–2006 гг. // Отчет о научно-исследовательской работе «Комплексный сейсмический и геофизический мониторинг геодинамических процессов в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг», гл. 21. – Петропавловск-Камчатский: Фонды КОМСП ГС РАН, 2009 г. – С. 228–250.
18. **Лемзиков В.К., Гусев А.А.** Энергетическая классификация близких камчатских землетрясений по уровню кода-волн // Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 4. – С. 83–97.
19. **Гордеев Е.И., Левина В.И., Чебров В.Н., Иванова Е.И., Ю.В. Шевченко, Степанов В.В.** Землетрясения Камчатки и Командорских островов // Землетрясения Северной Евразии в 1993 году. – М.: ГС РАН, 1999. – С. 102–114.