

**ОЛЮТОРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 20 (21) АПРЕЛЯ 2006 г. $M_w=7.6$:
СЕЙСМИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ РЕГИОНА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ СЕРИИ АФТЕРШОКОВ**

Ландер А.В.¹, Левина В.И.², Иванова Е.И.²

*1 Международный Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, г. Москва*

*2 Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
valeria@emsd.iks.ru*

Аннотация

Исследовалась сейсмичность очаговой области сильнейшего землетрясения, произошедшего 20 апреля 2006 г. (21 апреля по местному времени) на территории Корякского Автономного округа. Используются последние данные региональной сети Камчатского филиала Геофизической службы РАН. Данные не являются полными, поскольку ко времени написания статьи, почти через год после события, процесс в очаге Олюторского землетрясения еще продолжался. Анализ проведен по полному каталогу землетрясений первых пяти суток после главного события, а также по выборочному каталогу сильных землетрясений апреля-мая. Приведен обзор сейсмичности Корякского нагорья за весь период инструментальных наблюдений.

Введение

Олюторское землетрясение 20 апреля 2006 г. с магнитудой $M_w=7.6$ произошло на юге Корякского нагорья и значительно превосходило по силе все наблюдавшиеся здесь ранее сейсмические события. За пятнадцать лет до него 8 марта 1991 г., практически в той же точке произошло сильное Хаилинское землетрясение с $M_w=6.6$ [3]. Оба события являлись уникальными на фоне предыдущей сейсмической истории региона, где ранее наблюдались только редкие слабые землетрясения. В 1991 г. действующая карта районирования территории СССР (ОСР-78) относила область Корякского нагорья к зоне 5-6-балльных сотрясений. Землетрясение 8 марта 1991 г. вызвало сотрясения интенсивностью 7-8 баллов в населенных пунктах округа. В новой карте сейсмического районирования России (ОСР-97-А) область очага Хаилинского землетрясения была переведена в зону 8-балльной интенсивности сотрясений [6]. Однако Олюторское землетрясение вызвало в некоторых поселках Корякского Автономного Округа сотрясения в 9 баллов. Зону выхода очага на поверхность, где были обнаружены сейсморазрывы общей протяженностью около 140 км, можно отнести к 10-11 балльной зоне.

Олюторское землетрясение сопровождалось мощной серией афтершоков, которая к началу 2007 г. еще не завершилась. По данным USGS на конец февраля 2007 г. в области очага произошло 300 землетрясений с $3 < m_b \leq 6.6$ [24]. Настоящая статья посвящена анализу части данных об афтершоковом процессе Олюторского землетрясения, полученных Камчатской региональной сетью, и обработанных к концу 2006 г. (965 землетрясений). Материал состоит из трех частей: полный набор данных Камчатской сети за первые пять суток активности очага, выборочные данные о наиболее сильных афтершоках, произошедших в течение апреля-мая 2006 г. и данные о слабых землетрясениях, зарегистрированных 3-6 мая в период работы в эпицентральной зоне трех временных станций.

Уникальный для региона характер Олюторского землетрясения порождает множество вопросов о его тектонической позиции и причинах, приведших к возникновению столь сильного и неожиданного события. Поэтому мы не ограничимся описанием очагового процесса, но сначала приведем обзор сейсмичности Корякского нагорья и прилегающих территорий за все время инструментальных наблюдений и коротко остановимся на общих тектонических причинах, порождающих активность этого региона.

Сейсмичность Корякского нагорья до Олюторского землетрясения
Корякский сейсмический пояс. Известная по инструментальным наблюдениям сейсмическая история Корякского нагорья подразделяется на два совершенно неравноценных по активности

периода (рис.1,2). Частично это связано с удаленностью, малой населенностью региона, полным отсутствием здесь до 90-х годов сейсмических станций и, как следствие, неполнотой и неточностью ранних наблюдений. Но очевидна и значительная активизация региона, начавшаяся по второй половине 80-х - началу 90-х годов, и продолжающаяся по настоящее время.

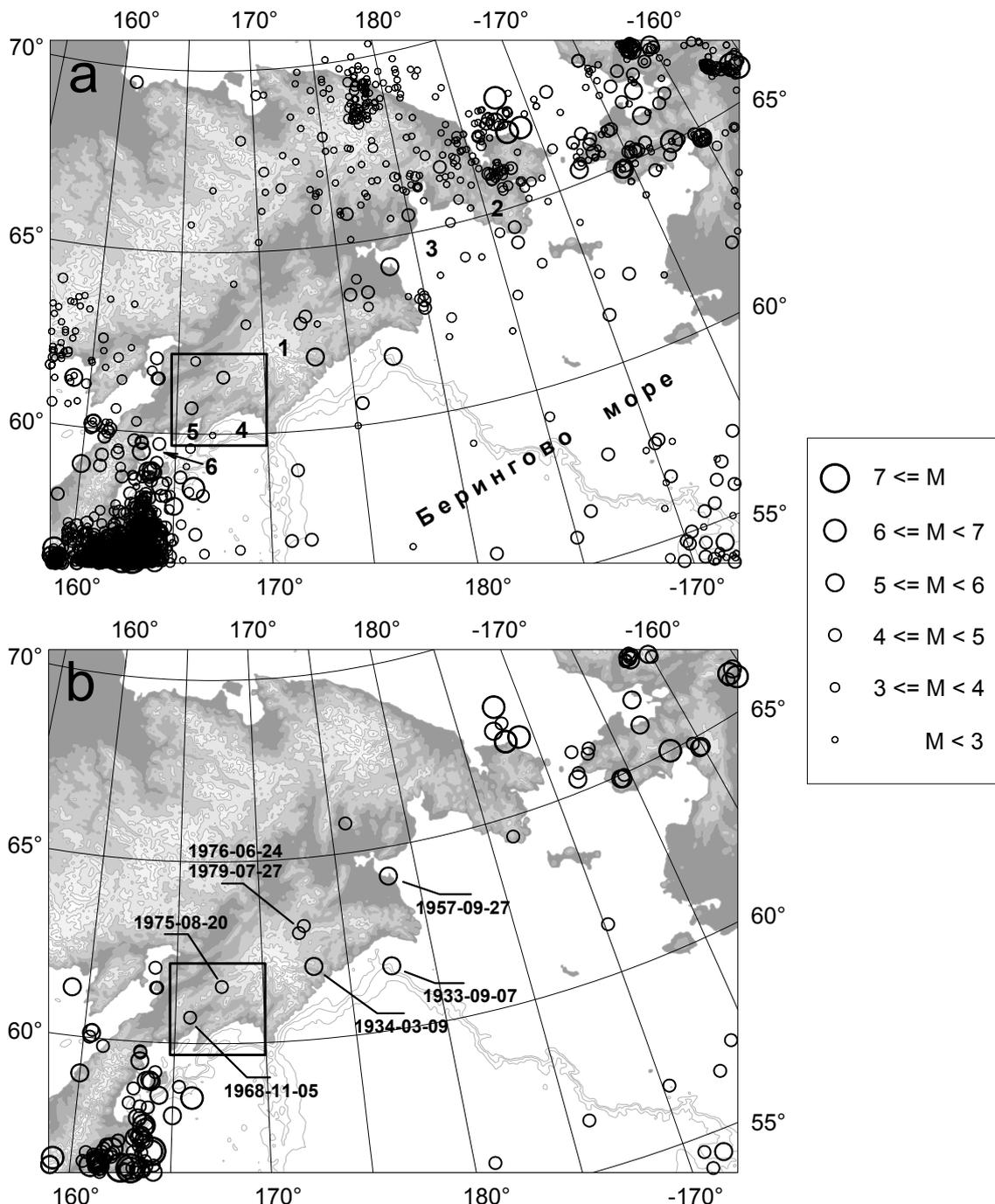


Рис.1. Сейсмичность северо-западной окраины Берингоморского региона за 1925-1984 гг. [2,4,5,10,12,15, 18,19,20,23,24]; а - все инструментально зарегистрированные события, б - сильнейшие землетрясения с магнитудой от 4.5. Жирным прямоугольником выделена очаговая область сильнейших в Корякии (более поздних) Хаилинского, 1991 г., M=6.6, и Олюторского, 2006 г., M=7.6, землетрясений. На карте (а) цифрами отмечены встречающиеся в тексте: 1 - Корякское нагорье, 2 - Чукотский п-ов, 3 - Анадырский залив, 4 - Олюторский залив, 5 - залив Корфа, 6 - Карагинский залив.

С 1925 по 1984 год в Корякском нагорье и прилегающей акватории Берингова моря было зафиксировано около 35 землетрясений, только три из которых имели магнитуды больше 5 (максимальная 5.7). На карте сейсмичности, соответствующей концу 1984 г., отдельные эпицентры, многие из которых имеют низкую точность определения, располагаются хаотически,

занимая широкую область между двумя более активными сейсмическими поясами: Западной Аляски - Чукотки и Арктики - хр.Черского - Северной Камчатки (рис.1а). Хотя в то время предполагалось, что эти два пояса сейсмичности должны соединяться, но положение наиболее активных структур и возможных границ плит оставалось неясным [8].

В последующие 22 года, начиная с 1985, в регионе зарегистрировано уже 62 события с магнитудами 5 и выше. Подавляющее большинство, 57 из них, являются афтершоками двух крупных, практически совпадающих в пространстве, землетрясений: Хаилинского, 8 марта 1991 г., $M_w=6.6$, и обсуждаемого в данной статье Олюторского $M_w=7.6$, которые, возможно, следует рассматривать как проявления единого сейсмического события. Число регистрируемых слабых толчков в других частях региона с середины 80-х годов также увеличилось по сравнению с ранним периодом, но не столь значительно, и этот факт можно отнести к повышению детальности наблюдений. Однако, важно, что большинство событий располагается закономерно, образуя непрерывный Корякский сейсмический пояс, продолжающий пояс Аляски - Чукотки на юго-запад через Корякское нагорье к Камчатскому перешейку, где он, соединяясь с поясом хр.Черского, достигает границ Тихоокеанской плиты (рис.2). Вытянутая в северо-восточном направлении очаговая область Хаилинского и Олюторского землетрясений является частью Корякского пояса, составляя примерно 1/5 его длины. Корякский сейсмический пояс образует северо-западную границу самостоятельной плиты Берингии [9,22].

Согласно оценкам [9] Берингия вращается относительно Северной Америки по часовой стрелке вокруг полюса с координатами $67^\circ N, 176^\circ E$, расположенного в Центральной Чукотке. При этом на ее северо-западной Корякской границе просходит постепенная смена в юго-западном направлении условий правого сдвига в Анадырском заливе на сжатие в районе о-ва Карагинского. Согласно этой модели в районе Хаилинского и Олюторского очагов предполагаются взбросовые движения с компонентой правого сдвига.

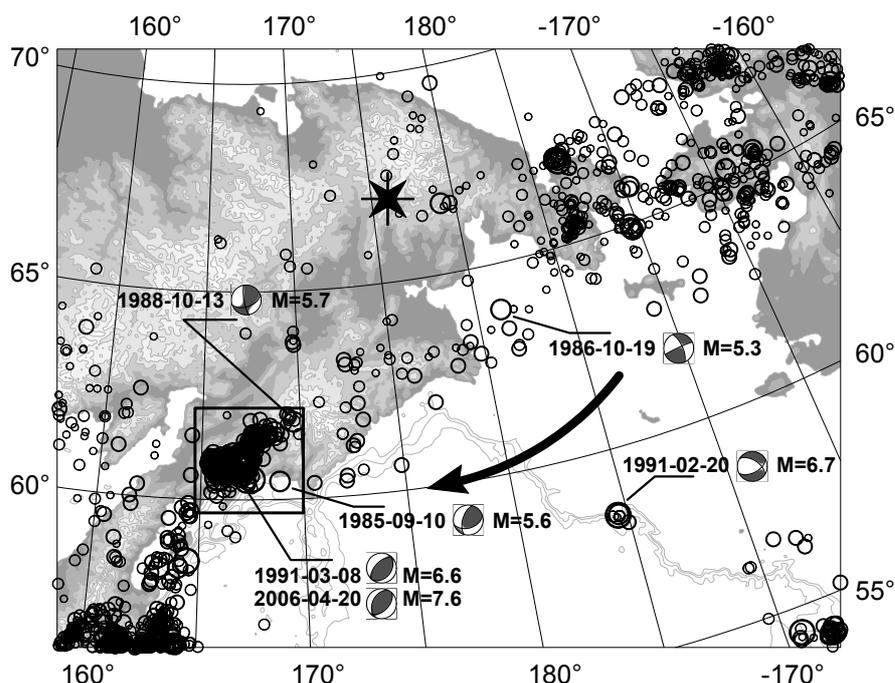


Рис.2. Сейсмичность северо-западной окраины Берингоморского региона за 1985-2006 гг. [2,4,5,12,15,16,18,20,24]. Звездой показан полюс вращения Берингии относительно расположенных северо-западнее районов Северо-Американской плиты, стрелкой указано направление вращения [9]. Жирный прямоугольник Олюторской очаговой области, как и магнитудная легенда соответствуют рис.1.

Ранний период наблюдений. Первое известное нам инструментально зафиксированное землетрясение, которое, возможно, имеет отношение к Корякскому поясу, отмечено в каталоге Аляски и Алеутских островов [23]. Оно произошло 27 мая 1925 г., координаты эпицентра даны весьма приблизительно: $60^\circ N, 175^\circ E$, и соответствуют точке, расположенной в Беринговом море в 150 км от Корякского побережья, магнитудные данные отсутствуют.

Более определенные данные о двух землетрясениях 7 сентября 1933 и 9 марта 1934 гг. с магнитудами 5.3-5.9 приведены в каталоге Гутенберга (рис.1b) [19]. Эпицентр 1934 г. располагается непосредственно в пределах Корякского нагорья, правда, его координаты также приведены с точностью до градуса. Еще одно землетрясение магнитуды 5.7 произошло 27 сентября 1957 г. у юго-западного побережья Анадырского залива. Все остальные известные события региона до 1985 г. не достигали магнитуды 5 (рис.1a).

Ретроспективный взгляд на раннюю сейсмичность Корякии позволяет утверждать, что, несмотря на эпизодичность и невысокую точность определений гипоцентров, основные события того времени также были приурочены к Корякскому сейсмическому поясу (рис.1b). Особенно интересны землетрясения 5 ноября 1968 г., $M=4.5$ и 20 августа 1975 г., $M=4.7$, произошедшие в пределах очаговой зоны будущего Олюторского землетрясения. Присутствие этих событий, по-видимому, говорит о том, что сильные Хаилинское и Олюторское землетрясения возникли не на месте длительно существовавшей сейсмической брешы, а наследуют процесс "непрерывный" в масштабе первых десятилетий. Впрочем, в масштабе первых лет, как будет показано ниже, перед каждым из этих сильных землетрясений наблюдалось кратковременное затишье.

Активизация региона до Хаилинского землетрясения. Рост уровня сейсмичности Корякского пояса, по-видимому, следует отнести к середине 80-х годов. За шесть лет с 1985 до сильного Хаилинского землетрясения 1991 г. произошло три события с магнитудами 5.3-5.7 (то есть столько же, сколько за предыдущие 50 лет): 10 сентября 1985 г. в Олюторском заливе, 19 октября 1986 г. в Анадырском заливе и 13 октября 1988 г. в центральной части Корякского нагорья (рис.2). Кроме того, у южного окончания Корякского пояса в северной части Карагинского залива 20-21 мая 1986 г. происходит серия из пяти землетрясений с магнитудами 4.0-4.9.

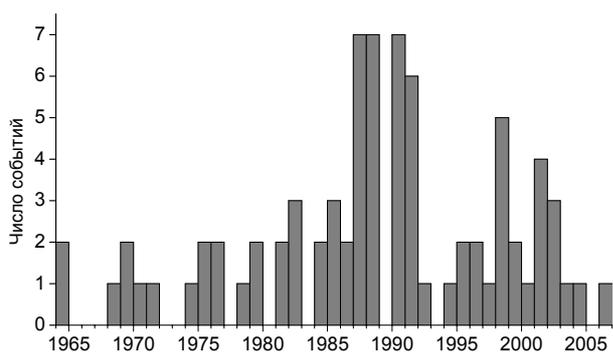


Рис.3. Распределение по годам числа слабых землетрясений Корякского нагорья, $M < 5.0$ с 1964 г. по момент возникновения Олюторского землетрясения 20 апреля 2006 г. Из подсчета исключены все афтершоки, а кратковременные рои представлены одним событием.

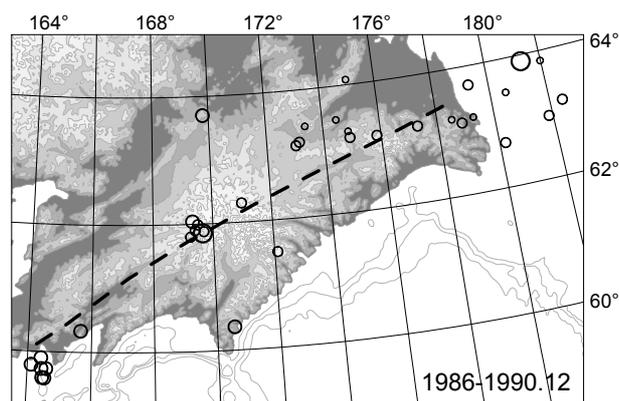


Рис.4. Сейсмичность Корякского нагорья в период активизации, предшествовавшей началу процесса в очаге Хаилинского землетрясения. Магнитуды землетрясений соответствуют легенде Рис.1. Пунктирной линией показана Хатырско-Вывенская зона разломов [9].

Формально активизация второй половины 80-х - начала 90-х годов хорошо заметна и на уровне слабой сейсмичности. На рис.3 приведено распределение по годам числа событий Корякского нагорья и прилегающих акваторий с магнитудой меньше 5.0 с 1964 г. по момент Олюторского землетрясения 2006 г. Из подсчета исключены все афтершоки, а кратковременные рои представлены одним событием. На графике очевидно значительное увеличение частоты слабых землетрясений в интервале 1987-1991 гг. Однако, данный рост определяется в основном увеличением числа слабых событий с $M < 3.5$ и может существенно зависеть от изменения уровня надежной регистрации для данного региона. Действительно, с начала 80-х по начало 90-х годов на Чукотке существовала стационарная сейсмическая сеть, и основная информация о слабой сейсмичности северной части Корякского нагорья получена по ее данным. Однако активизация произошла лишь в конце интервала времени действия сети. Поэтому данный факт, на наш взгляд, заслуживает внимания.

Землетрясения, происходившие на начальной стадии активизации, с 1986 г. до сильного Хаилинского землетрясения 1991 г., располагаются в пространстве достаточно закономерно. В пределах точности определения гипоцентров большинство из них тяготеет к протяженной зоне молодых, секущих древние структуры и хорошо дешифрируемых на космических снимках, разломов, протянувшихся вдоль осевой линии Корякского нагорья в северо-восточном направлении (рис.4). Той же зоне соответствуют гипоцентр и механизм главного толчка самого Хаилинского землетрясения (рис.5). Поскольку специальные полевые исследования этой зоны не проводились, в [9] она была условно названа Хатырско-Вывенским линеаментом (значительная часть зоны проходит вдоль протяженных долин рек Хатырки и Вывенки). Там же было сделано предположение, что Хатырско-Вывенский линеамент является главной структурой современной северо-западной границы плиты Берингии. Это предположение, конечно, является серьезным упрощением, и, как показали дальнейшие события, не описывает всех деталей сейсмичности Корякского нагорья. Однако необходимо заметить, что на линеаменте (или на его простирации в Анадырском заливе на северо-востоке и Карагинском заливе на юго-западе) располагаются гипоцентры главных толчков всех сильнейших землетрясений региона, начиная с 1986 г. (рис.4,8). Вдоль него протянулась на 200 км и очаговая зона Олюторского землетрясения (рис.2,14). Учитывая, что современная активность структуры продолжает подтверждаться, в дальнейшем мы будем говорить о Хатырско-Вывенской зоне разломов.

Из рис.4 следует, что на начальной стадии активизируются центральная, северо-восточная и крайняя юго-западная части Хатырско-Вывенской зоны, а в будущей очаговой области Хаилинского и Олюторского землетрясений перед началом основного процесса наблюдается, как минимум, пятилетнее затишье. Единственное событие $M=4.3$ вблизи этой области произошло 25 августа 1990 г. на северо-западном побережье залива Корфа, примерно за полгода до Хаилинского землетрясения, в 85 км от его эпицентра, и, возможно, должно рассматриваться уже как форшок главного толчка.

Хаилинское землетрясение. Процесс активизации очага Хаилинского землетрясения 1991 г., по-видимому, начался за 19 дней до главного толчка. 17 и 20 февраля 1991 г. практически в будущем эпицентре (отклонение до 20 км находится в пределах точности инструментальных определений) произошли землетрясения с магнитудой 3.9 и 4.5 соответственно. В промежутке между ними 18 февраля в заливе Корфа, в 100 км от будущего эпицентра произошло землетрясение $M=4.8$ (рис.5).

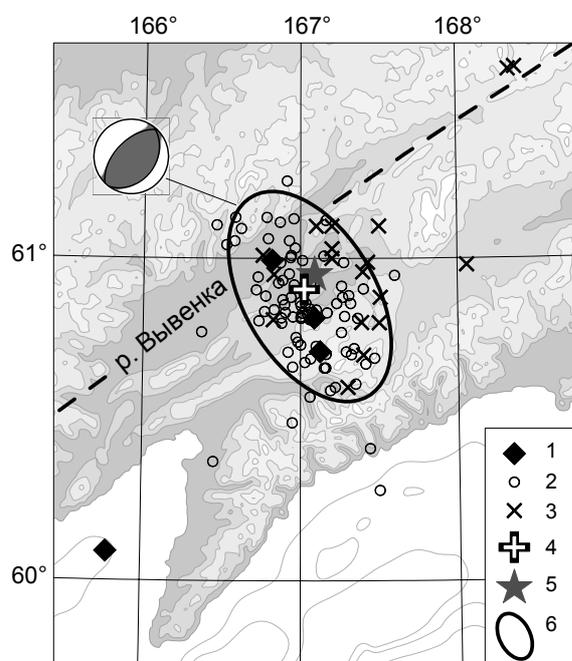


Рис. 5. Сейсмический процесс в очаговой области Хаилинского землетрясения 8 марта 1991 г., $M_w=6.6$.

1 - форшоки февраля 1991 г.; 2 - афтершоки начального этапа 1991-1992 гг.; 3 - афтершоки 1994-1999 гг. после двухлетнего затишья; 4 - инструментальный эпицентр Хаилинского землетрясения; 5 - инструментальный эпицентр Олюторского землетрясения 2006 г.; 6 - эллипс аппроксимирующий форму всей очаговой зоны Хаилинского землетрясения.

Пунктиром показана осевая линия Хатырско-Вывенской зоны разломов. Стереодиаграмма тензора сейсмического момента главного толчка Хаилинского землетрясения приведена по [21].

Нельзя не отметить неожиданное событие, которое случилось менее, чем через сутки после последнего из трех перечисленных форшоков в 1 тыс. км восточнее. 21 февраля 1991 г. в центре Берингова моря на северо-восточном континентальном склоне Алеутской котловины прошла короткая серия из 8 землетрясений, первое из которых имело магнитуду 5.0, а второе, сильнейшее, $M=6.7$ (рис.2). Район, в котором располагались эпицентры этих событий, удален от границ плит и ранее был практически асейсмичен. Землетрясения такой силы, как и последовавшее через 15

дней Хаилинское, являются достаточно уникальными для центральных и северных частей Беринговоморского региона. За предыдущие 80 лет инструментальных наблюдений здесь было зарегистрировано всего около 10 подобных или более сильных толчков. Маловероятно, что близость во времени двух уникальных событий является случайной, особенно учитывая, что землетрясение в Беринговом море произошло сразу после начала Хаилинского форшокового процесса. Однако какие либо физические модели, объясняющие данное совпадение, на сегодня отсутствуют.

Еще один форшок в Хаилинском очаге достаточно большой магнитуды 5.2 зарегистрирован всего за два с половиной часа до главного события.

Основной толчок Хаилинского землетрясения $M_w=6.6$ произошел 8 марта 1991 г. и имел взбросовый механизм с плоскостью разрыва юго-западного простирания (совпадающего с простиранием Хатырско-Вывенской зоны разломов) [3, 21, 9]. Инструментальный эпицентр располагался на левом юго-восточном борту долины р.Вывенки (рис.5). Выходы главного разрыва на поверхность не были обнаружены. По косвенным данным - пространственному распределению в облаке афтершоков областей горизонтального сжатия и растяжения предполагалось, что плоскость основного разрыва имела северо-западное падение [9]. Однако после произошедшего там же Олюторского землетрясения с противоположным азимутом падения [13] это предположение требует дополнительной проверки.

Сразу после главного толчка последовала короткая, но интенсивная серия афтершоков, которая продолжалась около трех с половиной месяцев и закончилась в конце июня 1991 г. (рис.6). За это время в Хаилинском очаге было зарегистрировано Камчатской региональной и мировыми сетями 80 событий, 18 из которых имели магнитуду 5.0 и выше (все - в первые полтора месяца) [3,4,20,24]. После этого активность очаговой зоны резко уменьшилась, с середины 1992 г. прекратилась почти на два года, но затем вновь возобновилась и продолжалась до сентября 1999 г. (рис.7). После спада активности только два землетрясения: 17 июля 1992 г. и 3 января 1997 гг. имели магнитуды выше 5 (5.3 и 5.7 соответственно) и сопровождалась собственными короткими афтершоковыми сериями. В последующие два с половиной года в очаговой зоне наблюдались слабые толчки, не достигавшие магнитуды 4.0. В целом процесс в Хаилинском очаге продолжался восемь с половиной лет и включал 108 зарегистрированных событий (включая форшоки).

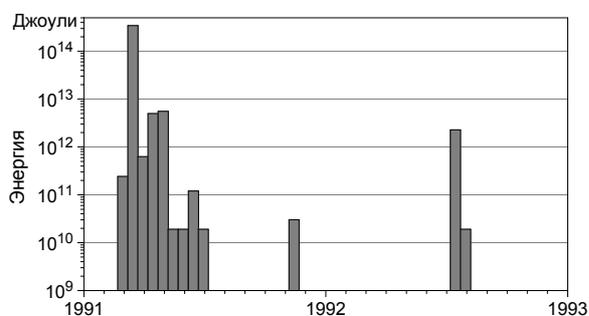


Рис.6. Распределение сейсмической энергии по полумесячным интервалам в начальный период активности очаговой зоны Хаилинского землетрясения - от форшоков февраля 1991 г. до длительного затишья 1992-1994 годов.

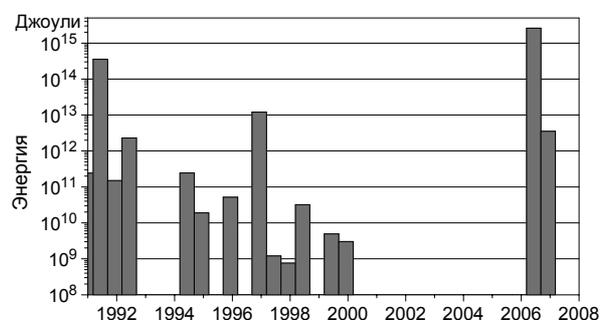


Рис.7. Распределение сейсмической энергии по полугодовым интервалам в течение всего периода активности общего очага Хаилинского и Олюторского землетрясений - от начала 1991 г. и по состоянию на конец февраля 2007 г.

После сентября 1999 г. не только в пределах Хаилинского очага, но и во всей значительно большей очаговой зоне будущего Олюторского землетрясения наступило затишье. В течение 6-ти с половиной лет, вплоть до главного толчка $M_w=7,6$ здесь не было зарегистрировано ни одного события. Таким образом, форшоков у Олюторского землетрясения, в отличие от Хаилинского, не наблюдалось.

Форма очаговой области Хаилинского землетрясения, построенная по облаку афтершоков, в плане аппроксимировалась эллипсом, вытянутым в юго-восточном направлении (рис.5), с размерами большой оси 80 км и малой 45 км [3]. В свете предыдущих обсуждений подобная форма является несколько неожиданной. Действительно, большая ось облака афтершоков

перпендикулярна как основным древним и современным структурам региона, включая Хатырско-Вывенскую зону разломов, так и простираниям большинства плоскостей разрыва, определенным по механизмам главного толчка и афтершоков [21]. В [9] подобная ситуация интерпретировалась как результат расположения большинства афтершоков в узкой полосе на плоскости, падающей на северо-запад, и фактически предполагалось, что структуры перпендикулярного юго-восточного простирания в очаговой зоне отсутствуют. Однако, в 1993 г. в юго-восточной части очаговой зоны был обнаружен свежий поверхностный сейсморазрыв - чистый левый сдвиг юго-восточного простирания с амплитудой перемещения 0.5 м и протяженностью около 2-х км [11]. Сейсмогенный характер разрыва и его связь с общим Хаилинским процессом не вызывают сомнений, по-видимому, он является результатом афтершока 17 июля 1992 г., $M_w=5.2$, механизм которого близок к левому сдвигу. Таким образом, присутствие в очаговой зоне Хаилинского землетрясения поперечных структур можно считать установленным. Аналогичные проблемы возникают и при детальном рассмотрении облака афтершоков Олюторского землетрясения.

Сейсмичность Корякского нагорья в интервале между Хаилинским и Олюторским землетрясениями. Проследим подробнее за изменениями сейсмического процесса во всем Корякском нагорье в 1991-2006 гг. в соответствии с этапами развития Хаилинского очага. Рассмотрим четыре временных интервала: (а) 1990 - февраль 1991 гг. - один год до главного Хаилинского толчка, включая время возникновения форшоков; (b) - март 1991 - 1992 гг. - время интенсивного афтершокового процесса и его затухания вплоть до двухлетнего затишья в 1992-1994 гг.; (с) 1994 - 1999 гг. - возобновление и окончательное завершение серии Хаилинских афтершоков; (d) - 2000 - апрель 2006 гг. - сейсмическое затишье во всей очаговой области будущего Олюторского землетрясения. На рис.8 приведены карты сейсмичности Корякского нагорья для четырех указанных временных интервалов.

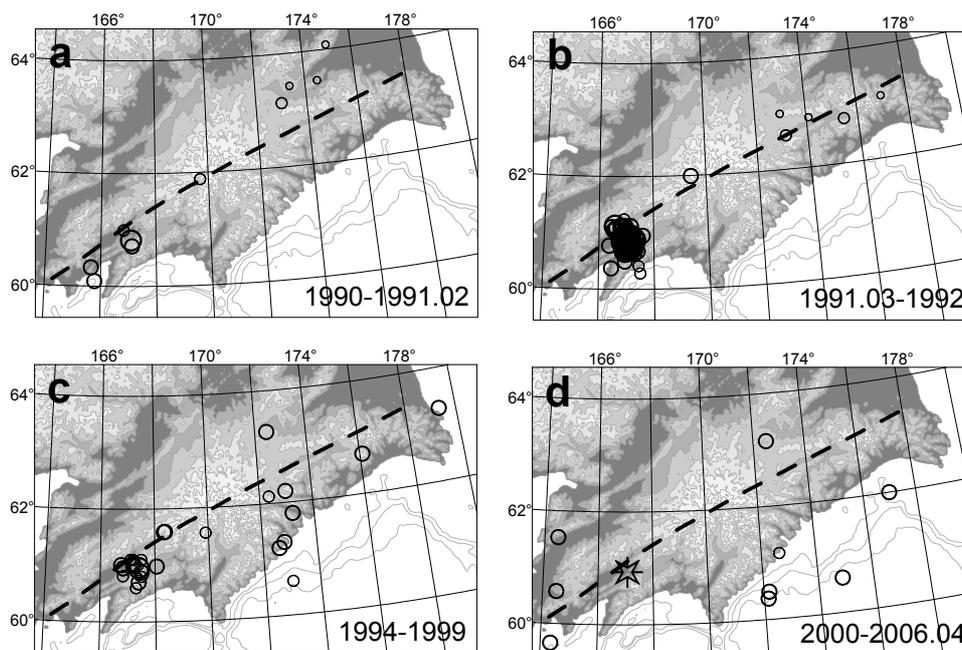


Рис.8. Сейсмичность Корякского нагорья на различных этапах развития Хаилинского очага. Пунктирная линия - Хатырско-Вывенская зона разломов. На карте (d) звездой указан эпицентр Олюторского землетрясения, произошедшего сразу по завершении данного временного интервала. Пояснения в тексте.

Приведем возможную интерпретацию сейсмического процесса в Корякском нагорье за период между двумя крупными событиями. Как кажется, карты рис.8 демонстрируют, что после возникновения Хаилинского очага существовала определенная корреляция его активности с сейсмичностью на остальных участках Хатырско-Вывенской зоны разломов. На карте рис.8a видно как в конце 1990 - начале 1991 гг. оживает прежде молчавший Вывенский отрезок зоны - будущий Хаилинский и Олюторский очаг. Карта рис.8b соответствует периоду максимальной активности афтершокового процесса Хаилинского землетрясения. Два первых периода характеризуются слабой, но типичной для региона, активностью вдоль всей остальной Хатырско-Вывенской зоны. Следующий период на картах отсутствует - в середине 1992 г. в регионе

наступило двухлетнее сейсмическое затишье. За это время не только в Хаилинском очаге, но и во всем Корякском нагорье не было зафиксировано ни одного землетрясения. В июне 1994 г. в 100 км северо-восточнее эпицентра Хаилинского землетрясения происходит двойное событие с магнитудами ≈ 4.5 (оно изображено также на рис.5). Позднее до этого района будет простирается Олюторский очаг. Всего через 2 месяца возобновляется Хаилинский афтершоковый процесс, который продолжается до 1999 г. В это время вновь активна и вся Хатырско-Вывенская зона вплоть до Анадырского залива (рис.8с). С 2000 г. в районе Хаилинского (будущего Олюторского) очага наступает затишье. И вновь в это время пассивна вся Хатырско-Вывенская зона, а сейсмичность Корякского нагорья мигрирует в основном на Беринговоморский шельф (рис.8d).

Обратим внимание (рис.8с,d), что в период 1996-2004 гг. в регионе возникает субмеридиональная цепочка из 9 землетрясений, не связанная с Хатырско-Вывенской зоной. Цепочка протянулась вдоль 172-173 меридианов из центральной части Корякского нагорья на юг до шельфа Берингова моря. Этой цепочке не соответствует какой-либо известной структуре Корякского нагорья.

Сейсмичность очага Олюторского землетрясения

Исходные материалы. Методические аспекты обработки данных. Землетрясение произошло в труднодоступном и малоизученном районе Корякского нагорья. 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. Единственная станция сети «Каменское» (КАМ) находится в 175 км к северо-западу от главного события. Другая ближайшая станция «Оссора» 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)), а также данные станции сети IRIS («Магадан» (MA2), «Билибино» (BILL)). Кроме того, 2 – 18 мая в эпицентральной зоне работали временные станции «Тиличики» (ST01), «Хаилино» (ST02), «Ледяная» (ST03). На станции «Тиличики» впоследствии был установлен комплект регистрации сильных движений, данные которого также использовались в обработке. Карта расположения сейсмических станций, данные с которых участвовали в обработке, приведена на рис. 9.

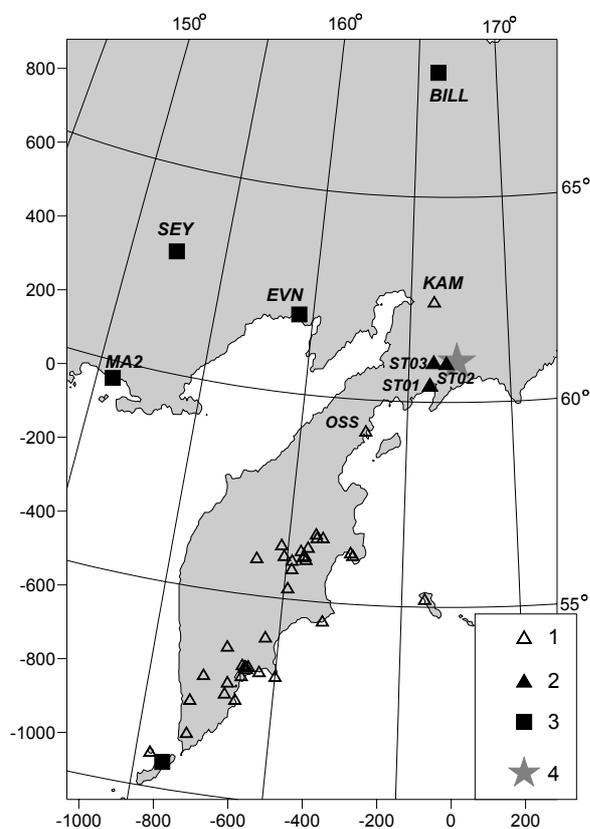


Рис.9 Карта расположения сейсмических станций
 1 – постоянные станции КФ ГС РАН
 2 – временные станции КФ ГС РАН
 3 – станции Магаданского и Сахалинского филиалов ГС РАН
 4 – инструментальный эпицентр Олюторского землетрясения

Положение гипоцентров определялось по стандартным методикам используемым в текущей обработке землетрясений КФ ГС РАН [1]. Однако в модели распространения волн были внесены изменения, соответствующие расположению гипоцентральной зоны относительно станций сети. В стандартной обработке используется скоростная модель среды И.П. Кузина и С.А. Федотова [7], рассчитанная для гипоцентров, расположенных в фокальной зоне Камчатки, что соответствует подавляющему большинству событий регистрируемых Камчатской региональной сетью. Однако гипоцентры Олюторских афтершоков располагаются на малых глубинах в пределах континентальной коры, что во многих случаях меняет типичную волновую картину на записях. Кроме того трассы от Олюторского очага на разные станции Камчатки сильно отличаются. Часть из них полностью проходит по континентальным областям, другие включают значительные океанические участки. Первые оценки показали, что использование единого годографа для всех станций приводит к значительным 20-50 км систематическим смещениям определенных гипоцентров на восток. Поэтому специально для Олюторского очага была проведена работа по расчету станционных поправок к стандартным годографам вступлений Р и S фаз. Было отобрано 31 землетрясение, для которых имелись данные временных, расположенных в пределах эпицентральной зоны, станций, а времена вступлений на остальных станциях заведомо не содержали грубых ошибок в идентификации фаз. Для этих землетрясений, используя специально разработанный вариант методики совместного переопределения гипоцентров, были получены все станционные поправки. Найденные поправки были включены в стандартные программы расчета времен пробега волн и в дальнейшем использовались для определения гипоцентров всех землетрясений, произошедших в очаговой зоне Олюторского землетрясения.

Для энергетических оценок, также в соответствии со стандартами Камчатской региональной сети, использовался энергетический класс K_S , который определялся по номограмме С.А. Федотова для землетрясений фокальной зоны Камчатки [17], с поправками, рассчитанными специально для землетрясений Корякского нагорья. Примерно для 300 событий имеются независимые оценки магнитуд [16,24]. Поэтому для удобства пользования каталогом во всех случаях, когда это возможно, мы сопровождаем значения энергетических классов соответствующими магнитудными оценками.

В настоящее время в КФ ГС РАН создан разноуровневый каталог очаговой зоны Олюторского землетрясения, включающий:

- I. полный каталог событий за 20-25 апреля: 535 событий с $4.8 \leq K_S \leq 15$, минимальный представительный класс $K_{min}=8.0$;
- II. выборочный каталог землетрясений за период 26 апреля – 1 мая и 7 –31 мая. 114 событий с $5.4 \leq K_S \leq 14.0$, минимальный представительный класс $K_{min}=9$;
- III. каталог землетрясений за период работы временных станций (3 – 6 мая). 316 событий с $3.5 \leq K_S \leq 9.3$, минимальный представительный класс $K_{min}=4.5$.

На рис. 10 приведены кумулятивные графики повторяемости для каждой из частей каталога.

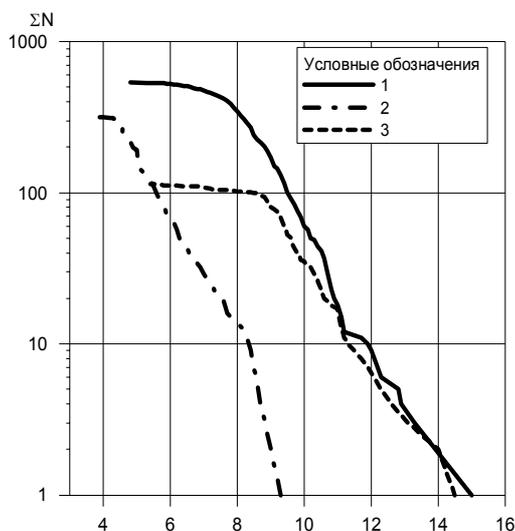


Рис. 10. Кумулятивные графики повторяемости для различных частей разноуровневого каталога афтершоков КФ ГС РАН:
 1 - полный каталог событий за 20-25 апреля;
 2 - каталог за период работы временных станций (3 – 6 мая);
 3 - выборочный каталог землетрясений за 26 апреля - 1 мая и 7 –31 мая.

Очаговые параметры главного толчка Олюторского землетрясения. В таблице 1 и на рис.11 приведены сведения о положении инструментального гипоцентра, магнитуах и механизме по данным различных сейсмологических служб.

Таблица 1 Сводка определений параметров очага Олюторского землетрясения

t_0 , ч мин с	Гипоцентр			M_0 , 10^{20} , Н·м	Магнитуды	Нодальные плоскости						Источ- ник
	φ°, N	λ°, E	h, км			NP1			NP2			
						STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
23 24 57.8	60.98	167.37	1		$M_c=7.8$	225	71	152	325	63	22	КФ ГС РАН[4]
23 24 58.7	61.02	167.08	10	0.79	MPSP=6.8; MPLP=7.0; MS=7.7; MW=7.2	194	48	66	48	48	114	СБ ГС РАН [16]
23 25 02.1	60.95	167.09	20	0.96	Ms=7.6; Mw=7.3; mb=6.8	75	44	134	202	60	56	USGS [24]
23 25 17.6	60.89	167.05	12	3.0	Mw=7.6	207	40	76	44	51	101	CMT [21]

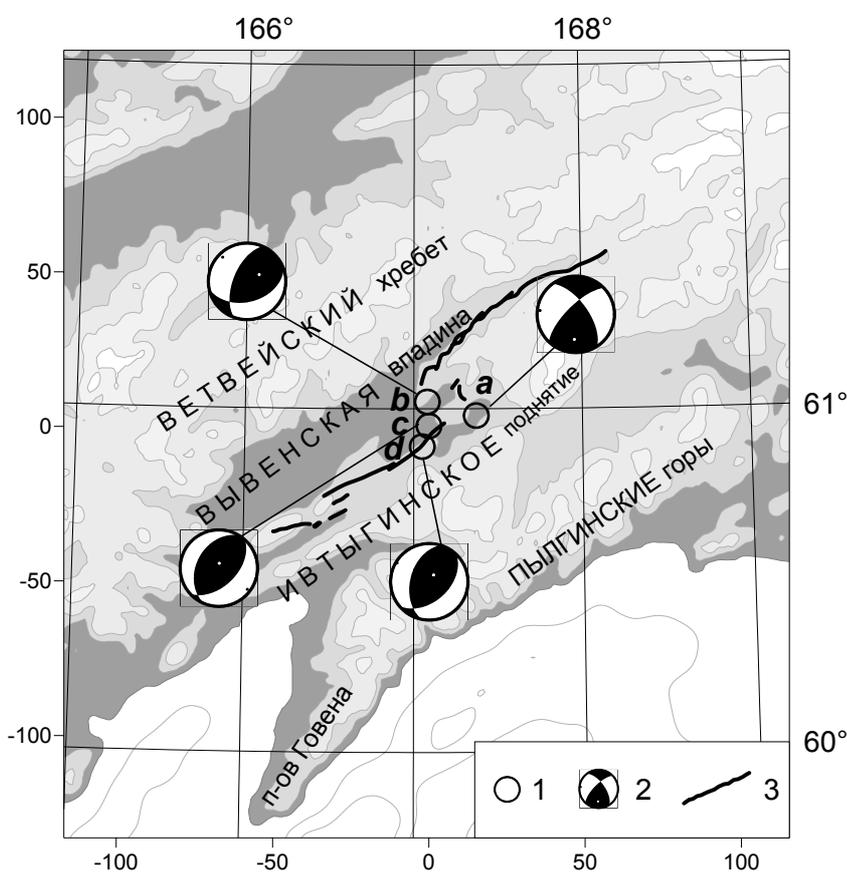


Рис.11. Оценки положения эпицентра и механизма главного толчка Олюторского землетрясения.

1 – эпицентр по данным различных служб (а – каталог КФ ГС РАН [4]; б – СБ ГС РАН [16]; с – каталог USGS [24]; д – центроид по данным Гарвардского каталога [21]); 2 – механизм очага (а, б – по знакам первых вступлений Р-волн [4, 16], с, д – ближайший двойной диполь к тензору сейсмического момента [24, 21]); 3 – сейсморазрывы по [13, 14]

Общие энергетические оценки очагового процесса. Сильнейшие афтершоки. Оценки энергии землетрясений проведены по энергетическому классу K_S [17]. Следует учитывать, что для сильнейших событий такая оценка может быть заниженной.

На рис.12 приведена временная зависимость куммулятивной сейсмической энергии, выделявшейся в очаговой зоне Олюторского землетрясения в течение 40 дней, начиная с главного толчка. Однако для вычислений мы расширили временной интервал, включив в него все афтершоки, произошедшие в Олюторском очаге ко времени написания статьи. График нормирован на значение полной энергии ($1.5 \cdot 10^{15}$ Дж.), выделившейся в очаговой зоне примерно за 10 месяцев, включая февраль 2007 г. Заметим, что на последние 7 месяцев активности очага приходится всего 0.58% всей энергии.

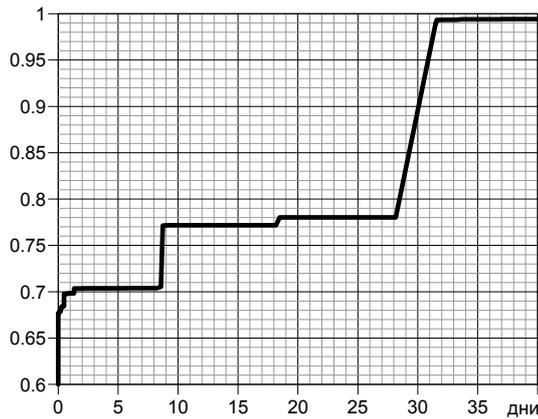


Рис.12. Временная зависимость сейсмической энергии, выделявшейся в очаговой зоне Олюторского землетрясения в течение первых 40 дней, начиная с главного толчка. График нормирован на значение полной энергии, выделившейся в очаговой зоне до конца февраля 2007 г.

Основные энергетические оценки, вытекающие из этого графика:

- 66 % полной энергии приходится на долю главного толчка, то есть на собственно Олюторское землетрясение, в абсолютных единицах его энергия составляет $1 \cdot 10^{15}$ Дж ;
- соответственно 34 % полной энергии приходится на афтершоковый процесс, что составляет примерно половину энергии главного толчка;
- 28 % полной энергии (или 81 % энергии всего афтершокового процесса) выделилось в двух сильнейших афтершоках: 29 апреля ($K_S=14.0$, $M_W=6.6$) и 22 мая ($K_S=14.5$, $M_W=6.6$); эти афтершоки соответствуют по силе Хаилинскому землетрясению 1991 г.;
- 3.6 % полной энергии (11 % энергии всех афтершоков) выделилось в первые 12 часов афтершокового процесса, до первого относительного затишья;
- 99.4 % полной энергии выделилось в первые пять недель афтершокового процесса (до конца мая 2007 г.);
- 4.2 % полной энергии (более 12 % энергии всех афтершоков) выделилось в первые пять дней после главного события, для которых в настоящее время составлен полный каталог.

Приведенные энергетические оценки учитывают все сильнейшие афтершоки за 10 месяцев после главного толчка, поэтому они существенно не изменятся после построения полного каталога для того же периода.

За последнюю декаду апреля и май 2006 г. в Олюторском очаге произошло 19 (включая главный толчок) землетрясений с $K_S \geq 11.6$ ($M \geq 5.1$). Сведения об этих наиболее сильных событиях приведены в табл.2, а их положение в очаговой зоне отмечено на рис.13.

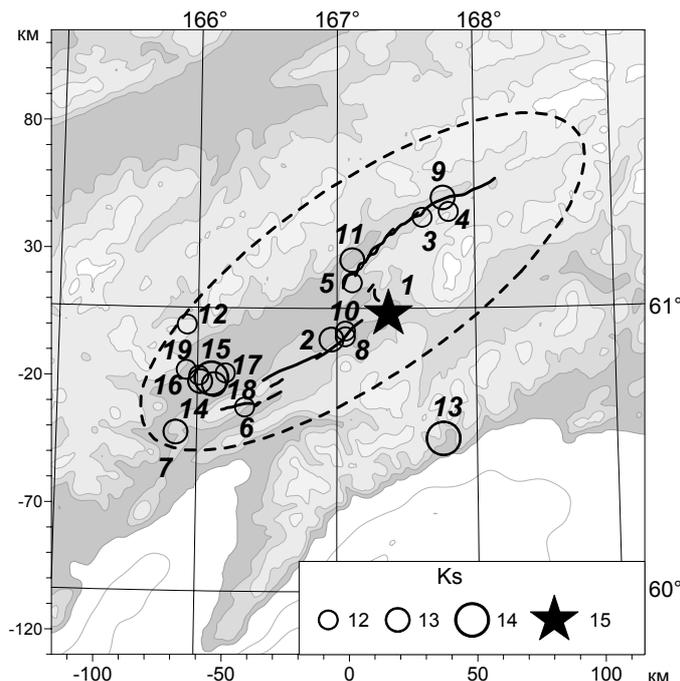


Рис.13. Эпицентры сильнейших событий, произошедших в очаговой зоне Олюторского землетрясения в течение первых 40 дней, начиная с главного толчка. Номера землетрясений соответствуют таблице 2.

Здесь и на следующих рисунках звездой отмечен эпицентр главного толчка, открытые кружки - эпицентры афтершоков, жирные линии - сейсморазрывы [13,14], пунктирный эллипс аппроксимирует форму очаговой зоны.

Таблица 2 Параметры сильнейших ($K_S \geq 11.6$) землетрясений Олюторской очаговой зоны за апрель-май 2007 г., определенные Камчатской региональной сетью и энергетические оценки по данным мировых каталогов

№	Дата г.м.д.	Время			Координаты		h, км	Энергетические оценки						
		ч	м	сек	φ°	λ°		КФ ГС РАН[4]		СБ ГС РАН[16]		NEIC[24]		HRV[21]
								K_S	M_C^1	MPSP	MS	MS	m_b	M_W
1	20060420	23	24	57.8	60.98	167.37	1	15	7.8	6.8	7.7	7.6	6.8	7.6
2	20060420	23	28	03.2	60.89	166.96	5	13.3	–	6.0	–	–	6.1	–
3	20060420	23	34	32.1	61.32	167.62	11	11.9	–	5.1	–	–	5.2	–
4	20060420	23	38	44.0	61.34	167.81	3	12	–	5.4	–	–	5.4	–
5	20060421	00	51	07.5	61.09	167.11	1	12.2	–	5.4	–	–	5.3	–
6	20060421	01	44	06.9	60.65	166.34	8	12	–	5.3	–	–	5	–
7	20060421	04	32	45.2	60.56	165.85	22	12.8	5.7	6.3	6.0	5.6	6.3	6.1
8	20060421	07	40	03.0	60.90	167.06	5	12.3	–	5.2	4.7	4.6	5.1	–
9	20060421	11	14	12.8	61.39	167.77	0	13.3	6.0	5.9	6.0	5.8	5.8	6.0
10	20060421	20	50	01.9	60.92	167.06	0	11.7	–	5.4	4.6	–	5.3	5.0
11	20060422	07	21	58.6	61.17	167.11	14	12.9	5.2	5.9	5.1	5.1	5.8	5.5
12	20060429	12	57	53.7	60.94	165.92	4	12.3	–	5.2	4.8	4.7	5.1	5.2
13	20060429	16	58	03.6	60.54	167.76	0	14	6.7	6.4	6.8	6.6	6.4	6.6
14	20060509	11	02	20.1	60.74	166.02	5	13.1	5.7	5.8	5.5	5.6	5.5	5.7
15	20060522	11	11	56.6	60.75	166.10	3	14.5	7.0	6.2	6.8	6.7	6	6.6
16	20060522	11	50	30.4	60.76	166.01	9	11.9	–	4.8	–	–	4.9	–
17	20060522	12	04	49.6	60.77	166.20	5	11.7	–	4.9	–	–	4.9	–
18	20060522	13	03	8.4	60.73	166.12	12	12.6	–	5.4	5.2	–	5.3	–
19	20060524	15	44	49.4	60.78	165.92	8	11.9	–	5.2	4.6	4.5	5.1	5.0

Примечание: 1– M_C – магнитуда по кода волнам

Два сильнейших афтершока (номера 13 и 15 в таблице): 29 апреля ($K_S=14.0$, $M_W=6.6$) и 22 мая ($K_S=14.5$, $M_W=6.6$), соответствуют по магнитуде Хаилинскому землетрясению 1991 г. Но они не породили сравнимых с Хаилинским собственных афтершоковых процессов. За землетрясением 22 мая в его окрестности последовала серия достаточно сильных толчков (максимальный класс $K_S=12.6$, $m_b=5.3$), но она продолжалась всего неделю. Событие 29 апреля имело единственный достаточно сильный собственный афтершок ($K_S=10.6$, $m_b=5.0$) и несколько более слабых.

Необходимо отметить, что землетрясение 29 апреля произошло в стороне от основной очаговой зоны на параллельных ей структурах (в 60 км к юго-востоку от эпицентра основного толчка). Поэтому, возможно, его следует рассматривать не как афтершок Олюторского, а как независимое событие. Тем не менее, их связь подтверждается тем, что всего через 35 минут после главного Олюторского землетрясения в районе будущего эпицентра 29 апреля зафиксирован "форшок" с $K_S=9.7$.

Весьма вероятно, что с сильнейшим афтершоком 22 мая связан крайний юго-западный 16-ти километровый сегмент зоны сейсмоструктурных нарушений, обнаруженный во время летних полевых работ на правом борту р. Авъеваям [14]. Кинематика этого разрыва (левосторонний сдвиг) противоположна движениям, наблюдавшимся в остальных частях зоны сейсмоструктурных дислокаций (где всюду присутствовала право-сдвиговая составляющая [13,14]) и механизму главного толчка. В то же время левосторонняя подвижка соответствует механизму сильнейшего афтершока 22 мая [21, также собственное определение]. Тем не менее, вопрос о соответствии сейсморазрыва данному афтершоку пока нельзя считать окончательно решенным. Различные инструментальные определения помещают землетрясение 22 мая в 15-30 км северо-западнее наблюдаемого сейсморазрыва (рис.13), что превосходит оценки точности положения эпицентра. Аналогичным образом смещено и все облако недельной серии афтершоков, сопровождавших данное событие. Подобные систематические смещения отсутствуют для эпицентров сильных событий в других частях зоны. К данному вопросу следует вернуться, когда накопление материала позволит уточнить станционные поправки к временам пробега сейсмических фаз.

Форма облака афтершоков. На карте рис.14а нанесены эпицентры всех 965 землетрясений, входящих в три обсуждаемые здесь разнородных каталога (определения Камчатской региональной сети). На рис.14b приведена соответствующая карта сглаженной (нормированной) плотности распределения этих эпицентров. Заметим, что каждый из трех каталогов включает землетрясения из всей очаговой зоны. Это оправдывает рассмотрение их совместного пространственного распределения.

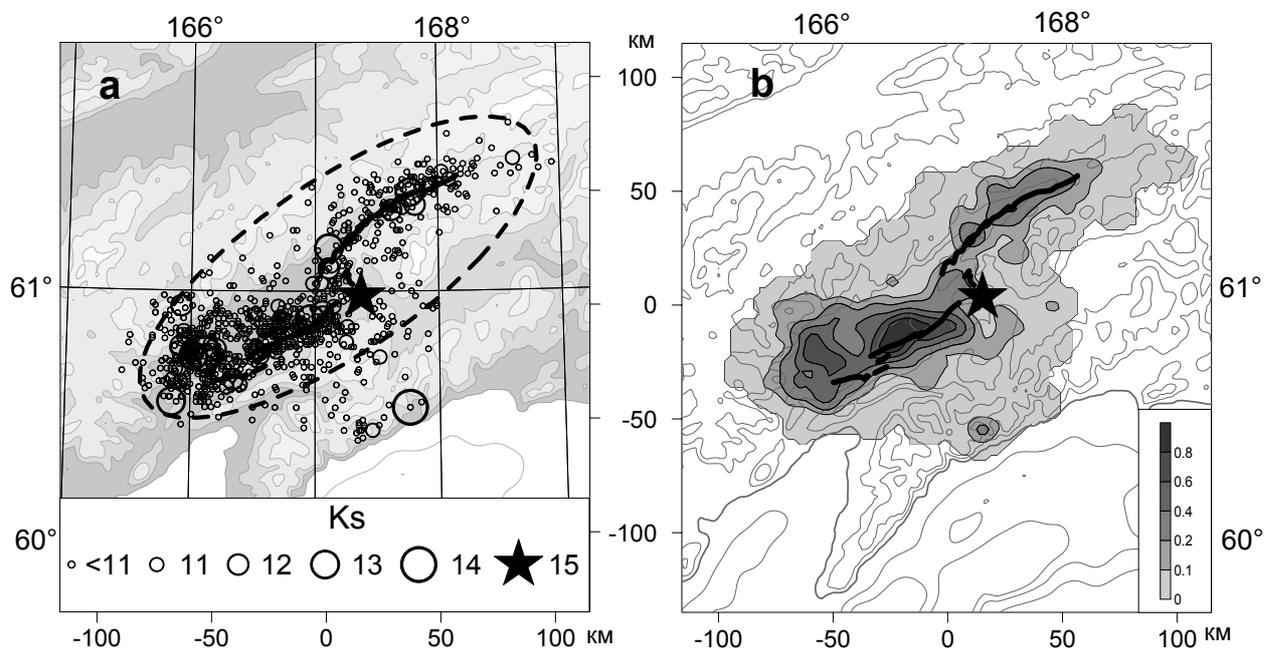


Рис.14. Пространственное распределение афтершоков Олюторского землетрясения по данным трех разнородных каталогов КФ ГС РАН.

(а) - карта сейсмичности с 20 апреля по 29 мая 2007 г.

(б) - карта сглаженной плотности пространственного распределения афтершоков (нормирована на максимальное значение плотности)

Максимальные значения плотности афтершоков располагаются в окрестности зоны сеймотектонических нарушений, протянувшейся вдоль юго-восточного борта долины р.Вывенки [13,14]. Исключение составляет юго-западная часть зоны, где на карте плотности афтершоков (рис.14b) выделяется поперечная структура, переходящая на противоположный борт долины Вывенки. Кроме того, область с меньшей плотностью событий распространяются на юго-восток от осевой части зоны, достигая побережья Олюторского залива, где произошел сильный афтершок 29 апреля ($K_s=14.0$, $M_w=6.7$).

Осевая часть зоны имеет сигмообразную, вытянутую на северо-восток форму. Однако для ее простейшего описания мы традиционно используем простейшую эллиптическую аппроксимацию. В этом грубом приближении основная часть зоны, где произошло подавляющее большинство (93 %) афтершоков, имеет размеры 205x75 км и простирается по большей оси 55° (пунктирный эллипс на рис.14а).

Глубина 99% афтершоков не превосходит 35 км. Однако для большинства событий она определена весьма неточно, что связано с удаленностью станций. Исключение составляют события, входящие в каталог 3-6 мая, для локаций которых использовались данные временных станций, располагавшихся в пределах эпицентральной зоны. Значения глубин этих землетрясений не превышают 20 км (рис. 16). Для остальных землетрясений доверительные области глубин часто захватывают всю земную кору. Тем не менее, отсутствие более глубоких решений подтверждает коровый характер очага.

Несмотря на большую неопределенность отдельных измерений, осредненные характеристики позволяют проследить закономерные изменения глубины очаговой зоны. На рис.15 приведена карта средних глубин афтершоков (получена ядерным сглаживанием глубин на эпицентральной плоскости). При построении этой карты совместно использованы данные всех трех имеющихся на сегодня каталогов Камчатской региональной сети (965 землетрясений).

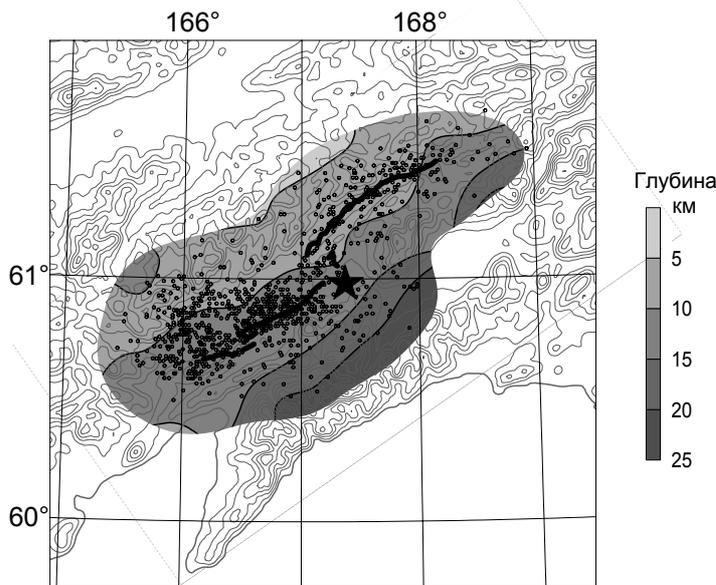


Рис.15. Карта средних глубин афтершоков Олюторского землетрясения по всем имеющимся данным трех разнородных каталогов КФ ГС РАН. При расчете исключено расположенное в стороне от основной зоны землетрясение 29 апреля и его афтершоки.

Карта рис.15 демонстрирует главные элементы геометрии осевой поверхности облака афтершоков: северо-восточное простирание, совпадающее с генеральным направлением сейсморазрывов, и юго-восточное падение (с максимальными углами 20° - 25°), что также соответствует наблюдаемому в сейсморазрывах взбросу юго-восточного крыла [13,14]. Таким образом, соответствуя в общих чертах наблюдениям на дневной поверхности, карта рис.15 дает представление о продолжении главного разрыва на глубины до 30 км. Однако построенная таким образом оценка поверхности разрыва оказывается сильно сглаженной. В ее форме не проявляются зафиксированные на поверхности кинематические различия между северо-восточной (взбросы) и юго-западной (сдвиги) частями очаговой зоны.

Более детальные элементы структуры облака афтершоков (хотя и на меньшей площади) удастся выделить, если ограничиться каталогом за 3-6 мая, в который включены землетрясения, в определении которых участвовали временные станции, располагавшиеся в эпицентральной зоне. Для проверки наклонного падения облака афтершоков на юго-восток мы отобрали 220 землетрясений, в обработке которых участвовали времена вступлений Р и S-волн на трех близких станциях: ST01, ST02, ST03, и построили по ним серию вертикальных разрезов. Средние ошибки определения эпицентра и глубины для этой группы землетрясений составляют 3.0 и 4.7 км, соответственно. Результаты приведены на рис.16.

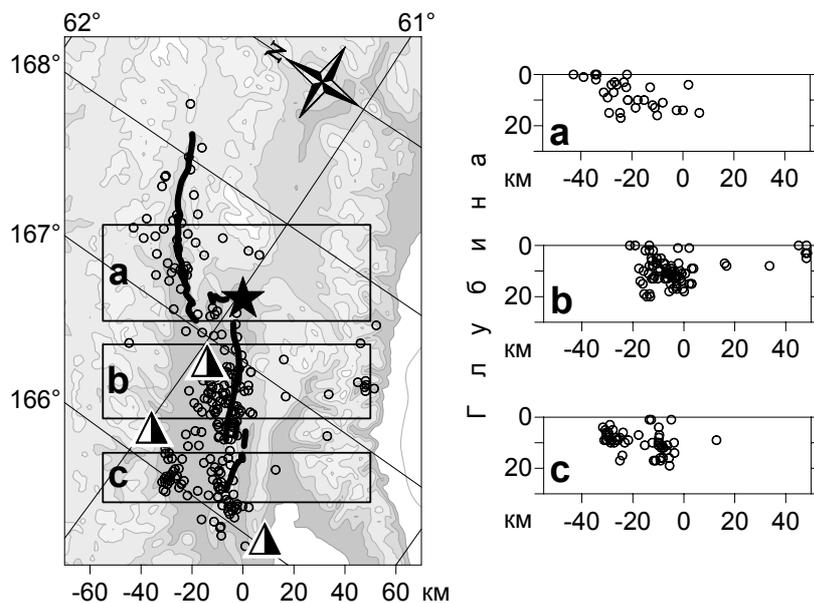


Рис.16. Вертикальные разрезы облака афтершоков Олюторского землетрясения. Сохранены только события, для которых имелись данные по трем временным станциям, установленным в эпицентральной зоне (каталог за 3-6 мая). На левой карте указаны полосы, по которым построены соответствующие разрезы. Горизонтальные оси координат на карте и разрезах соответствуют друг другу.

▲ - временные станции

Разрезы направлены вкост простирания зоны и соответствуют трем ее участкам, выделяемым по карте плотности афтершоков рис.14. На сечениях (а) и (б) достаточно четко виден

наклон облака афтершоков на юго-восток. В сечении (с) выделяются два сгущения афтершоков. Первое (на рисунке справа) соответствует субвертикальной плоскости, протянувшейся вдоль линии сейсморазрывов. Если рассматривать облако афтершоков как след поверхности основного разрыва, то разрезы (а-с) демонстрируют последовательное возрастание ее крутизны с северо-востока на юго-запад. Такая тенденция соответствует наблюдавшемуся в сейсморазрывах переходу от взбросов на северо-востоке к сдвигам на юго-западе [13,14].

Второе сгущение на разрезе (с) располагается на северо-западном борту долины Вывенки и, возможно, лежит на поперечной структуре северо-западного простирания. Разрез построен по данным за 3-6 мая, позднее область между двумя сгущениями была заполнена серией событий, начавшейся с сильного афтершока 22 мая.

Необходимо заметить, что, хотя наклоны облака афтершоков хорошо соответствуют кинематике поверхностных разрывов, эти две структуры устойчиво смещены в пространстве. Линия пересечения наклонной поверхности, образуемой афтершоками, и дневной поверхности на всем протяжении смещена относительно сейсморазрывов на 7-10 км в северо-западном направлении. Нельзя полностью исключить систематической ошибки в определении гипоцентров землетрясений. Однако определения NEIC [24] примерно для 250 афтершоков, полученные по практически независимым мировым данным, хорошо соответствуют используемым здесь определениям Камчатской региональной сети либо смещены еще западнее. Этим вопросам будет уделено особое внимание при обработке оставшегося значительного материала по афтершокам Олюторского землетрясения.

Пространственно-временное развитие области афтершоков. Олюторское землетрясение, в отличие от Хаилинского, не предварялось близкими по времени форшоками. Как отмечалось выше, с конца 1999 г. мировыми и региональными сетями в очаговой зоне не было отмечено ни одного землетрясения. На записях ближайшей станции «Каменское» 20 апреля, то есть в последние сутки перед главным событием, не было зарегистрировано слабых толчков из района будущего очага.

Главное землетрясение (№1 в таблице 2) произошло 20 апреля в 23 часа 25 минут (+13 часов по местному времени) в центре будущей очаговой зоны. Через 3 минуты в 25 км юго-восточнее последовал первый сильный афтершок с $K_S=13.3$, $m_b=6.1$ (землетрясение №2), а в следующие 10 минут еще два сильных события №№3,4 с K_S 11.9 и 12 (m_b 5.2 и 5.4) северо-восточнее главного эпицентра. На первых минутах после главного толчка идентификация слабых событий затруднена высоким уровнем помех на сейсмограммах.

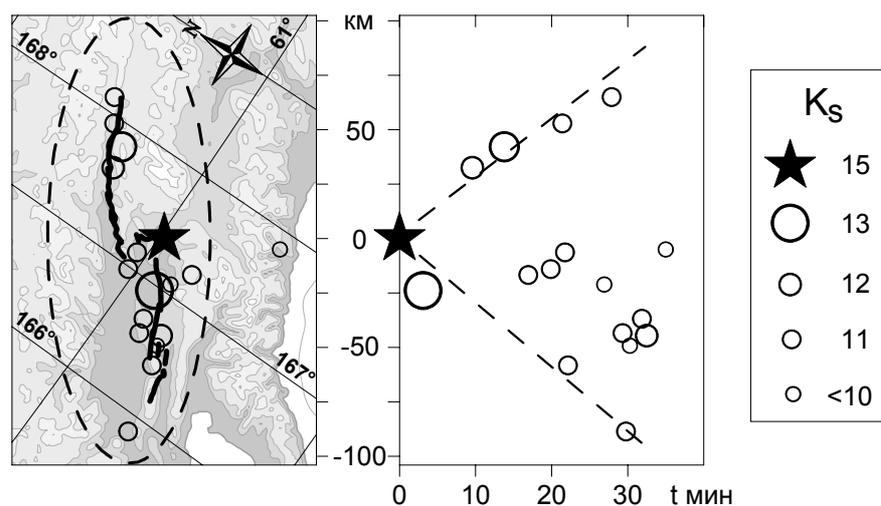


Рис.17. Миграция афтершоков вдоль большой оси очаговой зоны в первые 30 минут после главного толчка. На левой карте приведены эпицентры землетрясений, произошедших в первые 40 минут и эллипс, аппроксимирующий всю очаговую зону. Справа те же события изображены в координатах расстояние-время от главного события. На вертикальной оси отложены проекции эпицентров на большую ось эллипса. Пунктирные "линии миграции" приблизительно демонстрируют постепенное расширение области, охваченной афтершоками, в первые 30 минут после главного толчка.

В течение первых 30 минут после главного землетрясения афтершоковым процессом было охвачено 75% протяженности будущей очаговой области. При этом афтершоки "мигрировали" вдоль ее простирания, от центра к краям (рис.17). К 30-й минуте расстояние между крайними афтершоками составляло уже 155 км. В течение первого часа была охвачена площадь размером около 160x40 км. Наиболее интенсивный период активности очага пришелся на первые двенадцать часов. За это время произошло 186 землетрясений, из них 9 сильных (включая главное), и форма очаговой области оформилась практически полностью. Заключением первого этапа стал сильный афтершок №9 с $K_S=13.3$, $M_w=6.0$.

На рис.18 приведен билогарифмический график зависимости частоты афтершоков от времени для первых 100 часов активности очага. Частота определяется как обратный интервал времени между соседними событиями. График сглажен по 15 точкам. Общий спад активности за 100 часов происходит несколько быстрее, чем по степенному закону (приведенная на рисунке линия тренда является квадратичной параболой). Первые пять часов частота землетрясений превышает 20/час. К сотому часу она опускается до 3/час.

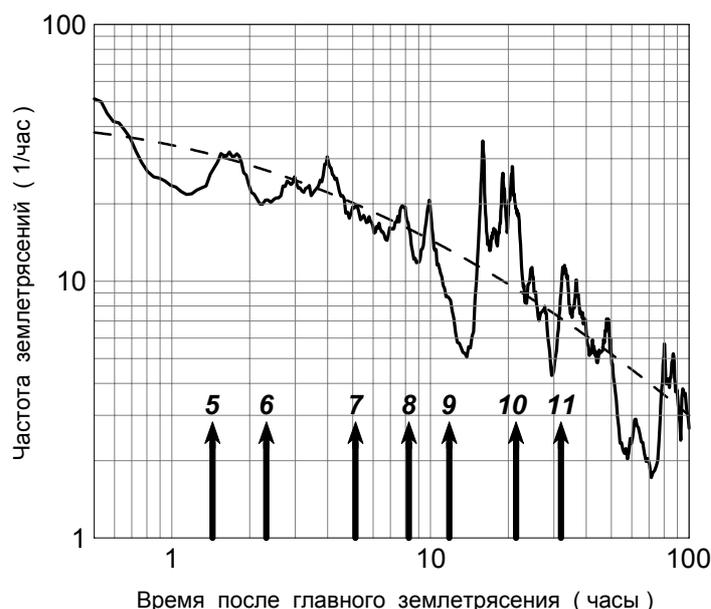


Рис.18. Изменение частоты афтершоков в Олюторском очаге в зависимости от времени в течение первых 100 часов после главного события.

Сплошная линия - частота событий, пунктир - длиннопериодный тренд. Черные стрелки в нижней части рисунка отмечают моменты сильных событий с $K_S \geq 11.6$. Цифры у стрелок соответствуют номерам землетрясений в таблице 2. Первые 30 минут исключены, поскольку в это время на сейсмограммах невозможна идентификация всех зарегистрированных событий.

Из рис.18 видно, что на фоне гладкого спадающего тренда в очаговой зоне происходят пульсации активности, в пределах которых частота событий отклоняется примерно в два раза относительно величины прогнозируемой по кривой тренда. Первое относительное затишье, когда частота событий падает с прогнозируемых 12/час до 5/час, приходится на 13-й час после главного землетрясения. В начале 15-го часа наступает активизация, которая охватывает всю очаговую область. При этом происходят только слабые землетрясения с частотой до 30/час. Единственное сильное событие №10 с $K_S=11.7$, $M_w=5.0$ замыкает этот 7-ми часовой период активизации. Следующий период активизации приходится на 32-40 часы и начинается с последнего перед недельным перерывом сильного события №11 $K_S=12.9$, $M_w=5.5$. Это событие происходит на северо-восточном отрезке очаговой зоны, но не активизирует его, а сопровождается роем слабых событий на юго-западе. Через двое суток частота афтершоков опускается ниже двух-четырёх событий в час и для надежной фиксации периодов активизации и затишья требуются ряды наблюдений большей длительности, которые в настоящее время отсутствуют.

Как отмечалось выше в настоящее время полный каталог афтершоков Олюторского землетрясения КФ ГС РАН ограничен 5 первыми сутками с момента главного события. За 120 часов в очаговой области зарегистрировано 534 события с $4.8 \leq K_S \leq 15.0$, из них 11 с $K_S \geq 11.6$. На рис.19 приведена карта сейсмичности очаговой области, соответствующая данному периоду наблюдений.

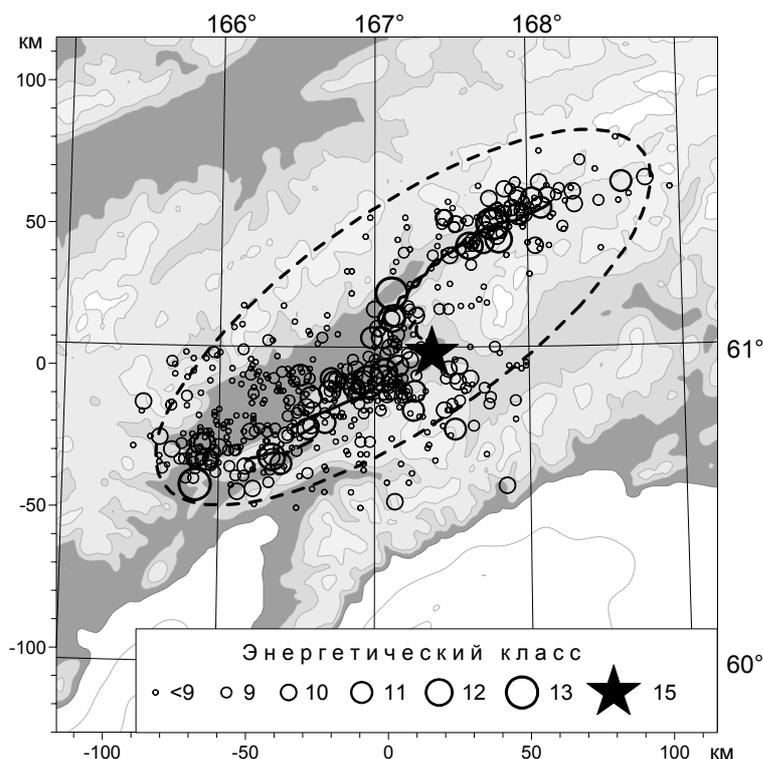


Рис.19. Карта сейсмичности очаговой зоны Олюторского землетрясения за 20-25 апреля, соответствующая полному каталогу КФ ГС РАН за этот период.

После 25 апреля афтершоки продолжали заполнять уже оформившуюся очаговую зону (рис.14). Исключение составляет сильное землетрясение №13 29 апреля ($K_S=14$, $M_W=6.6$), которое произошло в 60 км к юго-востоку от основного события на побережье Олюторского залива. Это событие располагается на значительном удалении от очаговой зоны, и ему предшествовал только один форшок с $K_S=9.7$ через 35 минут после главного толчка. После землетрясения №13 последовала серия более слабых событий, которая располагалась в том же районе, но в 20-30 км юго-западнее.

Наиболее активна на протяжении мая была юго-западная часть очага. 9 мая здесь произошло землетрясение №14 ($K_S=13.1$, $M_W=5.7$), а 22-27 мая прошла серия событий, которая началась самым сильным афтершоком № 15 ($K_S=14.5$, $M_W=6.6$).

Механизмы землетрясений. Предварительные расчеты механизмов главного события и афтершоков, происходивших в апреле-мае в очаговой зоне Олюторского землетрясения, проводились по стандартным методикам КФ ГС РАН, основанным на знаках смещений в первых вступлениях Р-волн. Использовались сейсмограммы станций Камчатской региональной сети, а также бюллетени NEIC [24] и еженедельный бюллетень ГС РАН [16]. Механизм очага определен для 20 землетрясений с энергетическим классом $K_S > 10.5$ и имеющих не менее 25 знаков первых вступлений Р-волны. По принятым в КФ ГС РАН стандартам качество 15 из 20 решений ниже среднего, однако, учитывая предварительный характер представляемых материалов, мы приводим все результаты.

На карте рис.20 приведены полученные решения механизмов и их пространственное распределение в пределах очаговой зоны. Все механизмы относятся к двум типам: взбросам и сдвигам. С учетом выбора (по геологическим данным) предпочтительных плоскостей разрыва встречаются как правые, так и левые сдвиги. Надежные сбросы среди решений отсутствуют. В северо-восточной части очаговой зоны преобладают взбросовые движения, хотя встречаются и сдвиги различных направлений. В юго-западной части зоны наоборот сдвиговые подвижки (также обоих типов) встречаются чаще взбросов (6 из 10). Два механизма афтершоков, относящихся к центральной части зоны, являются правыми сдвигами. Еще раз подчеркнем предварительный характер данной интерпретации механизмов, приведенных на рис.20.

Несколько решений представляют особый интерес. Механизм главного толчка (№1 на рис.20, таблица 1) формально определен как правый сдвиг с небольшой взбросовой компонентой. Однако в пределах ошибки данный механизм может считаться чистым правым сдвигом. Предпочтительная плоскость подвижки имеет типичное для структур очаговой зоны юго-запад -

северо-восточное простирание. Такое решение не соответствует длиннопериодным оценкам тензора сейсмического момента [21, 24, рис.11], в которых преобладает взбросовая компонента. Полевые наблюдения [13,14] определили, что в области главного эпицентра происходит смена преобладающего типа подвижки. Юго-западнее эпицентра наблюдаются в основном правые сдвиги, севернее и северо-восточнее преобладают взбросовые движения. Подобная картина приблизительно соответствует и описанной выше форме облака афтершоков, а также не противоречит распределению механизмов на рис.20. Поэтому, возможно, отличие механизма, построенного по первым вступлениям от результирующего тензора сейсмического момента говорит о том, что движение в очаге началось в юго-западном направлении как чистый правосторонний сдвиг и лишь через несколько секунд трансформировалось во взброс, захвативший северо-восточную часть очага. Этот вопрос предполагается подробнее изучить в дальнейшем.

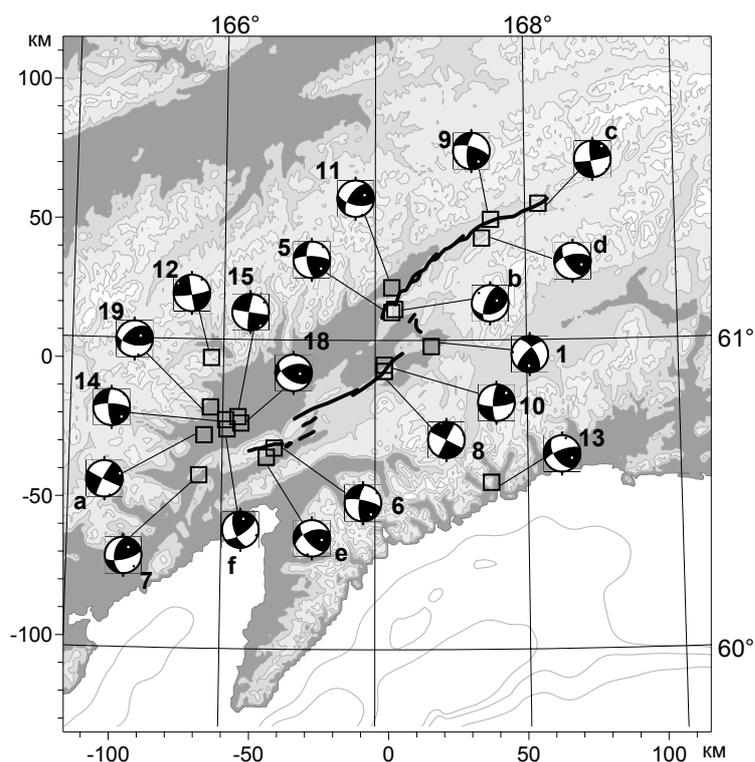


Рис.20. Карта механизмов очагов афтершоков Олюторского землетрясения. Открытыми квадратами обозначены эпицентры землетрясений. Цифры при диаграммах механизмов соответствуют номерам землетрясений в таблице 2. Отсутствующие в таблице события, с классом ниже 11.6 отмечены буквами:

- a – 21 апреля 16^h17^m $K_S=11.0$, $M_W=5.1$
- b – 21 апреля 16^h48^m $K_S=10.8$, $M_W=4.8$
- c – 23 апреля 01^h39^m $K_S=10.9$, $M_W=4.7$
- d – 25 апреля 12^h22^m $K_S=10.6$, $M_W=4.7$
- e – 29 апреля 23^h42^m $K_S=11.5$, $M_W=5.2$
- f – 24 мая 20^h48^m $K_S=11.0$, $M_W=4.8$

На юго-западном краю зоны сеймотектонических нарушений располагается 16-ти километровый субширотный разрыв, кинематика которого (левосторонний сдвиг) противоположна движениям, наблюдавшимся в остальных частях зоны. Поэтому весьма интересно, что в окрестности этого сейсморазрыва в разное время зафиксирована целая серия афтершоков, механизмы которых соответствуют левосторонним сдвигам по субширотным плоскостям. Это события: №6 ($K_S=12$, $m_b=5$), №14 ($K_S=13.1$, $M_W=5.7$) и №15 ($K_S=14.5$, $M_W=6.6$). Значительная левосторонняя составляющая присутствует и в землетрясении e на рис.20 ($K_S=11.5$, $m_b=5.1$). Наиболее вероятно, что сейсморазрыв связан с сильнейшим афтершоком №15, произошедшим 22 мая и близким по магнитуде к Хаилинскому землетрясению. Однако, первое из перечисленных событий произошло еще 21 апреля, а второе 9 мая. Это означает, что левосторонние движения на юго-западе зоны продолжались в течение практически всей наиболее активной стадии действия очага.

Второй крупнейший афтершок №13, также сравнимый с Хаилинским землетрясением, произошел 29 апреля ($K_S=14.0$, $M_W=6.6$) в стороне от основной очаговой зоны на побережье Олюторского залива. В его механизме также присутствует левосдвиговая составляющая (при выборе плоскости юго-западного простирания, что соответствует местной структуре), но преобладают взбросовые деформации.

Заключение

Олюторское землетрясение 20 апреля 2006 г., $M_w=7.6$, произошло в юго-западной части Корякского сейсмического пояса, который является современной северо-западной границей плиты Берингии и отделяет ее от Северо-Американской плиты. Согласно современным моделям в районе эпицентра землетрясения граница плит имеет конвергентный характер с правосдвиговой составляющей. Движения подобного типа преобладали и в очаге Олюторского землетрясения.

На сегодня это землетрясение является высшей точкой сейсмической активизации, охватившей Корякское нагорье с середины 80-х годов. Ранее сравнимых по силе сейсмических событий в регионе не было известно. Эпицентр Олюторского землетрясения практически совпадает с эпицентром предыдущего сильнейшего землетрясения Корякии - Хаилинского, 1991 г., $M_w=6.6$. Оба события уникальны для сейсмической истории региона последних 80-100 лет. Поэтому Хаилинское землетрясение, вообще говоря, можно считать форшоком Олюторского.

Олюторское землетрясение сопровождалось интенсивной серией афтершоков, которая еще продолжалась в феврале 2007 г. В настоящее время Камчатской региональной сетью определены параметры около тысячи из них, однако полностью обработано только пять первых дней афтершокового процесса, на которые приходится 554 события. Сильнейшие из афтершоков достигают магнитуды 6.7. За апрель-май в очаге Олюторского землетрясения зарегистрировано 19 событий энергетическим классом выше 11.5, из них 11 событий в течение первых пяти дней, а 9 – в первые двенадцать часов.

Полная сейсмическая энергия, выделившаяся в очаговой области за все прошедшее время ее активности, оценивается как $1.5 \cdot 10^{15}$ Дж. Две трети этой величины приходится на главное землетрясение и одна треть на афтершоковый процесс.

Очаговая область Олюторского землетрясения, занятая афтершоками, протянулась в северо-восточном направлении вдоль долины р. Вывенки на расстояние более 200 км. На протяжении 140 км большое число эпицентров концентрируется вблизи наблюдавшимся на поверхности сейсморазрывов. Ширина главной области афтершоков около 75 км, однако, небольшая часть землетрясений распространилась на юго-восток на расстояние до 60 км от эпицентра. Основное облако афтершоков располагается вдоль наклонной поверхности, падающей на юго-восток, причем крутизна ее падения растет с северо-востока на юго-запад.

В длиннопериодных оценках тензора сейсмического момента главного толчка преобладают взбросовые деформации. Однако в решении механизма по знакам первых вступлений большую роль играют правосдвиговые компоненты. Возможно последние преобладали в начальные моменты главной подвижки, но затем сменились на взбросовые движения.

Разнообразные факты: кинематика поверхностных сейсморазрывов, форма наклонной поверхности облака афтершоков, распределение механизмов землетрясений по очаговой зоне - говорят о том, что в северо-восточной и юго-западной ее частях происходили подвижки разного типа. Северо-восточнее главного эпицентра преобладают взбросы, а в 20 км к юго-западу от него – правые сдвиги. У юго-западного окончания зоны происходили деформации противоположного типа - левые сдвиги. По-видимому, с ними связан сильнейший афтершок, произошедший через месяц после главного землетрясения.

После Олюторского землетрясения Корякское нагорье должно рассматриваться как область высокой сейсмической активности, которая требует достаточно детальных наблюдений. В настоящее время на краях региона располагается всего две сейсмические станции. Как показал опыт обработки данных Олюторского землетрясения этого явно недостаточно для качественных текущих наблюдений. Только установка в эпицентральной зоне временных станций позволила рассчитать для конкретного очага поправки к стационарным годографам на станциях Камчатской региональной сети, и тем самым устранить значительные систематические сдвиги в оценках положения гипоцентров. Поэтому вопрос об организации на севере Корякии новых стационарных сейсмических станций является весьма актуальным.

В заключение авторы выражают благодарность всем сотрудникам лаборатории сводной обработки КФ ГС РАН за качественную обработку афтершоковой серии Олюторского землетрясения. Особенно хочется поблагодарить Шевченко Н.А. за ее творческий подход к этой, довольно трудной и кропотливой работе.

Список литературы

1. Гусев А.А. Определение гипоцентров близких землетрясений Камчатки на ЭВМ. //Вулканология и сейсмология 1979. №1. С. 74-81.
2. Землетрясения в СССР в 1962 - 1991 гг., М.: Наука, 1965-1997 .
3. Зобин В.М., Бахтиаров В.Ф., Борисенко В.С., Гусева Е.М., Иванова Е.И., Левин В.Е., Матвиенко Ю.Д., Самылов Н.И., Чиркова В.Н. Корякское землетрясение 8 марта 1991 г. Землетрясения в СССР в 1991 году. М.: ОИФЗ РАН, 1997. С.76–88
4. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов 1962-2006 КФ ГС РАН,
5. Каталог землетрясений Северной Евразии / Под ред. Н.В. Кондорской и В.И. Уломова. Фонды ИФЗ РАН. 2000
6. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000. Объяснительная записка. Москва-1999. 57 с.
7. Кузин И.П. Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки, М.: Наука, 1974, 145 с.
8. Ландер А.В. О современных границах плит на Северо-Востоке Азии. Тектоника и минералогия Северо-Востока СССР. Тез докладов школы-семинара. Магадан.: 1990, с.129-130.
9. Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дрознин Д.В., Кирюшин А.В.. Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 г.: существует ли плита Берингия?, Вычислительная сейсмология, вып. 26, М: Наука, 1994, с.103-122. (Англ. перевод: Lander, A.V., B.G. Bukchin, A.V. Kiryushin, and D.V. Drozdnin (1996). The tectonic environment and source parameters of the Khailino, Koryakiya earthquake of March 8, 1991: Does a Beringia plate exist? - Computational Seismology and Geodynamics, V.3, Am. Geophys. Un., Washington, D.C., p. 80-96)
10. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.Ж Наука, 1977
11. Отчет о работе в 1993 г. По теме «Уточнение карты общего сейсмического районирования КАО. Этап накопления и обработки полученных данных» Петропавловск-Камчатский, 1993, 362 с.
12. Отчет КОМСП ГС РАН «Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов (01.01.2004 - 31.12.2004)» г. Петропавловск-Камчатский 2004
13. Пинегина Т.К. Сейсмические деформации в эпицентральной зоне Олюторского землетрясения / Наст. сборник
14. 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 / Наст. сборник
15. Сейсмологический бюллетень Дальнего Востока, 1982-1989 гг., ДВО АН ССР, Южно-Сахалинск,; 1985-1992.
16. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2006 год. / Отв. ред. Старовойт. Обнинск: Изд-во ЦОМЭ ИФЗ РАН
17. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М. Наука, 1972. 117 с.
18. Alaska Earthquake Information Center, http://giseis.alaska.edu/Seis/html_docs/db2catalog.html
19. Gutenberg, B., and Richter, C.F., 1949, Seismicity of the earth and associated phenomena; Princeton University Press, Princeton, NJ, 273 p.
20. Bulletin of the International Seismological Centre. 1964-2003. <http://www.isc.ac.uk/>
21. Harvard CMT catalog <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
22. Mackey, K. G., Fujita, K., Gunbina, L. V., Kovalev, V. N., Imaev, V. S., Kozmin, B. M., and Imaeva, L. P., 1997, Seismicity of the Bering Strait region: evidence for a Bering block, *Geology*, v. 25, p. 979-982.
23. Taggart J.N. Alaska & Aleutian Islands Catalog 1786-1981 (USGS).
24. USGS National Earthquake Information Centre <http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html>