

ОЛЮТОРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 20 апреля 2006 г.**с $M_w=7.6$, $I_0=9-10$ (Корякское нагорье)****В.И. Левина¹, А.В. Ландер², Е.И. Иванова³, С.В. Митюшкина³, Н.Н. Титков³**¹ Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, vlr.levina@gmail.com² Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, land@mitp.ru³ Камчатский филиал ГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, г. Петропавловск-Камчатский, e-mail: mitik@emsd.ru

20 апреля 2006 г. в 23^h24^m (21 апреля в 12^h25^m местного времени) на территории Корякского автономного округа (КАО) в Корякском нагорье произошло сильное ($K_S=15.7$ [1], $M_w=7.6_{HRVD}$ [2]) мелкофокусное землетрясение [3]. Наиболее интенсивно землетрясение ощущалось в Олюторском районе КАО, поэтому ему было дано название «Олюторское». По магнитуде оно значительно превзошло наблюдавшийся здесь прежде уровень сейсмичности (сильнейшее из землетрясений Корякского нагорья имело магнитуду $M=6.6$, а остальные не превышали $M=5.7$). Очаговый разрыв вышел на поверхность на протяжении 140 км, и на нем зафиксированы подвижки амплитудой до 4 м [4, 5]. Землетрясение вызвало в пос. Тилички, Корф, Хаилино сотрясения с интенсивностью $I=8-9$ баллов по 12-балльной шкале MSK-64 [6]. За основным землетрясением последовала примерно полуторамесячная интенсивная серия афтершоков, наиболее сильные из которых имели магнитуду $M_w=6.6$. Афтершоковый процесс меньшей интенсивности продолжался на протяжении всего года и перешел на 2007 г.

Основные параметры землетрясения. Сводка определений параметров землетрясения, полученных из различных источников, приведена в табл. 1. Различные положения гипоцентра, определенные мировыми сейсмологическими агентствами, за исключением агентства ВЛ (Китай), решение которого находится существенно восточнее остальных, достигают расхождения до 25 км по долготе, но довольно согласованы в субдолготном направлении, в то время как региональное определение смещено примерно на 15 км на восток относительно определений по мировым сетям (рис. 1 б). Подобное смещение связано с односторонним расположением региональных сейсмических станций (рис. 1 а) относительно инструментального гипоцентра и вследствие этого большой неопределенностью по долготе [7].

Таблица 1. Основные параметры Олюторского землетрясения по данным различных сейсмологических агентств

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр							Магнитуда	Источник
			φ , N	$\delta\varphi$, км	λ , E	$\delta\lambda$, км	Az	h , км	δh , км		
KRSC	23:24:57.80	2.5	60.98	2.5	167.37	7.9		1	4.9	$K_S=15.7/15$, $M_c=7.0/1$	[1]
MOS	23:24:58.70	0.78	61.03	6.8	167.09	3.6	94	10		$M_w=7.2/1$, $M_S=7.7/82$, $MPSP=6.8/136$	[8]
ISC	23:25:02.96	0.07	61.04	1.94	167.10	1.54	133	27	27*	$M_S=7.6/208$, $m_b=6.6/428$	[2]
NEIC	23:25:02.15	0.09	60.95	2.8	167.09	1.8	13	22		$M_w=7.3$, $M_S=7.6/125$, $m_b=6.8/216$	[2]
IDC	23:24:58.39	0.29	60.93	9.5	167.02	8	138	0		$M_S=7.8/38$, $m_b=6.1/39$	[2]
ЕНВ	23:25:02.12		60.96	17	167.13	13	177	22			[2]
HRVD	23:25:02.20	0.1	60.89	1.1	167.05	1.1	-1	12		$M_w=7.6/110$	[2]
ВЛ	23:24:59.30		60.96		167.52	33				$M_S=8.3$, $m_b=6.3$	[2]
CRAAG	23:25:02.80		61.1		167.2					$M_w=7.7$	[2]
IGIL	23:25:06.00		61.09		167.1	43				$M_S=7.7$	[2]

Примечание. Символом «*» обозначено значение h по глубинным фазам pP . Сведения об агентстве см. в разделе «ОБОЗНАЧЕНИЯ» наст. сб.

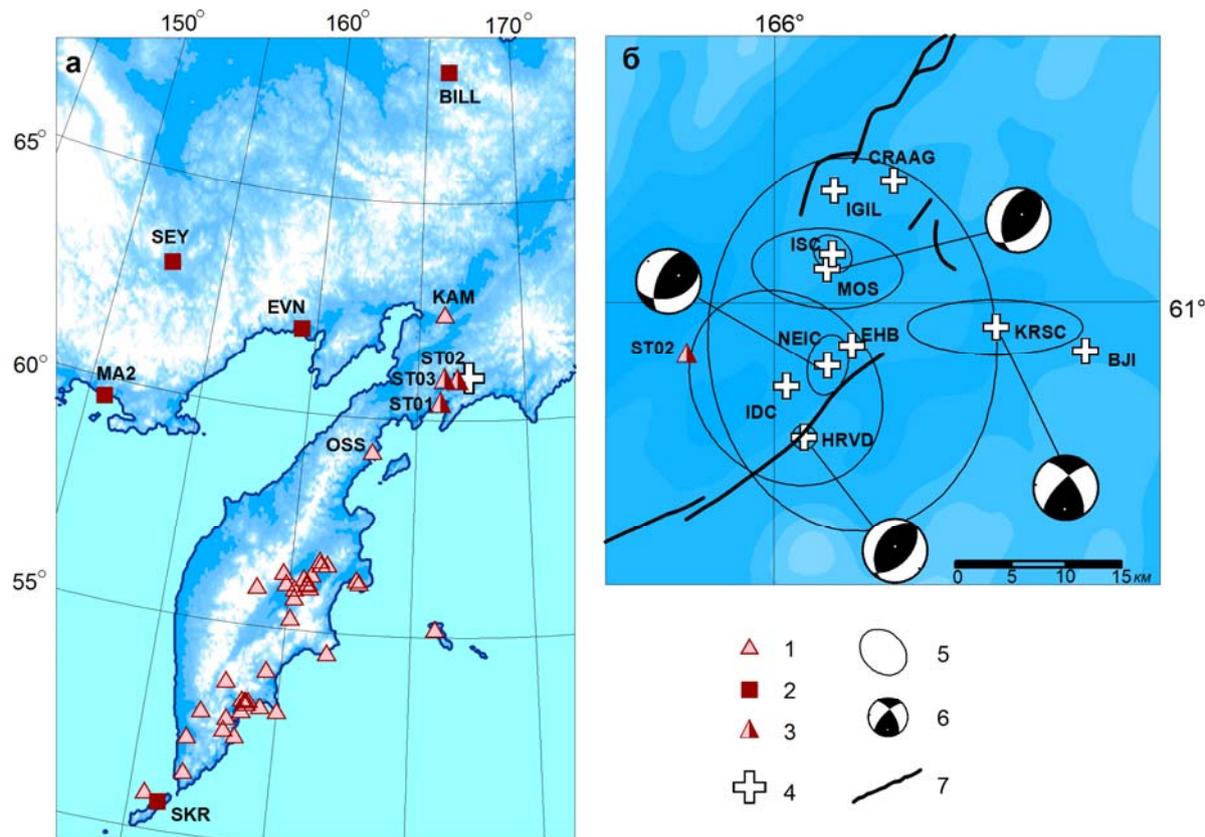


Рис. 1. Расположение сейсмических станций (а) и решение эпицентра главного толчка Олюторского землетрясения по данным различных служб (б)

1 – 3 – сейсмическая станция: постоянная КФ ГС РАН, Магаданского и Сахалинского филиалов ГС РАН, временная соответственно; 4 – инструментальный эпицентр по данным различных агентств; 5 – эллипс ошибок по данным соответствующего агентства; 6 – стереограмма механизма очага из [2, 9]; 7 – сейсморазрывы по [4, 5].

Стандартная методика, используемая в рутинной обработке землетрясений [10–12], регистрируемых региональной сетью сейсмических станций КФ ГС РАН, оказалась неприменимой для района Корякского нагорья. Эпицентры, определяемые по этой методике, были существенно сдвинуты на восток от истинной эпицентральной области. Для уточнения положения гипоцентров была проведена специальная методическая работа [7] по введению поправок к временам пробегов сейсмических волн от землетрясений, происходящих в эпицентральной зоне Олюторского землетрясения.

Гипоцентр Олюторского землетрясения определен по данным 36 станций Камчатской региональной сети, а также трех станций сети Северо-Восточного филиала ГС РАН. Локация проводилась по 39 фазам P -волн и по четырем фазам S -волн. Ближайшая к эпицентру станция «Каменское» (КАМ) была удалена на расстояние $\Delta=175$ км, следующая – «Оссора» (OSS) – на $\Delta=307$ км. В условиях такой редкой сети получить хорошие инструментальные данные об афтершоковом процессе столь сильного землетрясения довольно затруднительно. Поэтому 2–18 мая в эпицентральной зоне были установлены автономные цифровые сейсмические станции [13], позволившие получить довольно полный каталог афтершоков Олюторского землетрясения в период работы временных станций [14].

Энергетический класс K_S [15] Олюторского землетрясения определить непосредственно по записям S -волн оказалось невозможным из-за ограниченного динамического диапазона сейсмических станций сети, поэтому значение $K_S=15.7$ было получено путем пересчета из энергетического класса по коду K_c , определяемого в рутинной обработке, по соотношению $K_S=K_c$ [16].

При оценке величины сильных землетрясений традиционно отдается предпочтение магнитуде M_w . Для описываемого землетрясения она равна $M_w=7.6_{HRVD}$ (табл. 1).

Механизм очага Олюторского землетрясения определен различными сейсмологическими агентствами (табл. 2). В Камчатском филиале ГС РАН (KRSC) и Геофизической службе РАН (MOS) решение получено по данным первых вступлений *P*-волн. В качестве исходных данных в КФ ГС РАН используются знаки смещений первых вступлений *P*-волн на станциях Камчатской сети и на станциях мировых сетей [9]. В американских агентствах NEIC и HRVD определяется тензор сейсмического момента методом инверсии волновых форм. Этот метод считается более точным, чем по знакам первых вступлений *P*-волн.

Таблица 2. Параметры механизма очага Олюторского землетрясения 20 апреля 2006 г. в 23^h24^m с $M_w=7.6$ по данным различных сейсмологических агентств

Агентство	t_0 , ч мин с	h , км	Магнитуды				K_S	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Источник
			M_w	M_c	M_S	M_s		<i>T</i>		<i>N</i>		<i>P</i>		<i>NP1</i>			<i>NP2</i>			
								<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>STK</i>	<i>DP</i>	<i>SLIP</i>	<i>STK</i>	<i>DP</i>	<i>SLIP</i>	
KRSC	23 24 57.80	1		7.0			15.7	60	232	29	34	8	128	15	59	56	247	45	133	[9]
MOS	23 24 58.70	10	7.2		7.7			72	31	18	211	0	121	194	48	66	48	48	114	[8]
NEIC	23 25 02.15	22	7.3			7.6		60	61	29	221	9	316	75	44	134	202	60	56	[2]
HRVD	23 25 02.20	12	7.6					80	5	9	217	5	126	207	40	76	44	51	101	[2]

Стереогаммы механизма очага главного толчка в проекции нижней полусферы показаны на рис. 1 б. Согласно региональному решению, в очаге наблюдается правый сдвиг с небольшой взбросовой компонентой. Предпочтительная плоскость подвижки имеет простирание с юго-запада на северо-восток, типичное для структур очаговой зоны. Однако такой механизм несколько не соответствует решениям, полученным другими агентствами, где преобладает взбросовая компонента движений.

Макросейсмические данные. Олюторское землетрясение произвело значительный макросейсмический эффект на малонаселенной и слабосейсмичной территории Корякского автономного округа. В течение трех дней после землетрясения в эпицентральной зоне начались работы по сбору макросейсмических данных и обследованию очаговой зоны и населенных пунктов территории КАО силами сотрудников Института вулканологии ДВО РАН и Института физики Земли РАН. Макросейсмические проявления Олюторского землетрясения подробно описаны в статьях тематического сборника, посвященного этому событию [4, 5, 17, 18].

Расчетная интенсивность сотрясений в эпицентре $I_0^P \approx 10$ баллов получена по стандартному для Камчатки уравнению макросейсмического поля [19]:

$$I_0 = 1.5 MLH - 2.63 \lg h - 0.0087 h + 2.5$$

при $h_{рр} = 27$ км (табл. 1) и в предположении равенства $MLH = MS = 7.7$.

Главной особенностью сильнейшего в Корякском нагорье землетрясения 20 апреля 2006 г. явился выход его очага на дневную поверхность в виде разнообразных по кинематике сейсморазрывов, общей длиной порядка 140 км. Амплитуды вертикальных смещений в зоне разрыва достигали 2–3 м, а горизонтальных сдвиговых – 1.5 м [4, 5]. Зона магистрального сейсморазрыва разделяется на три сегмента: северо-восточный, центральный и юго-западный, отличающиеся по кинематике разрывов (рис. 2). На центральном сегменте наблюдаются правосдвиговые поверхностные сейсморазрывы, в то время как на северо-восточном и юго-западном – взбросы северо-западной направленности [4, 5, 20]. Область выхода очага на поверхность, где были обнаружены первичные сейсморазрывы, по интенсивности проявлений можно отнести к зоне с $I=9-10$ баллов.

В плейстосейстовой области широко представлены вторичные нарушения в виде сейсмогравитационных дислокаций и сеймовибрационных деформаций. Сеймовибрационные деформации в эпицентральной зоне проявились практически повсеместно в виде вторичных трещин с излияниями разжиженного грунта, просадок, грязевых вулканчиков. Гравитационные явления представлены не столь широко. Были отмечены обвалы и осыпи на крутых склонах в окрестности первичного сейсморазрыва. Область, охваченная вторичными сейсмодислокациями, имеет форму овала, вытянутого в северо-восточном направлении и длиной порядка 160 км. Ширина овала составляет 50–60 км [5]. Область возникновения вторичных сейсмодислокаций, как правило, относится к зоне с интенсивностью $I=7-9$ баллов.

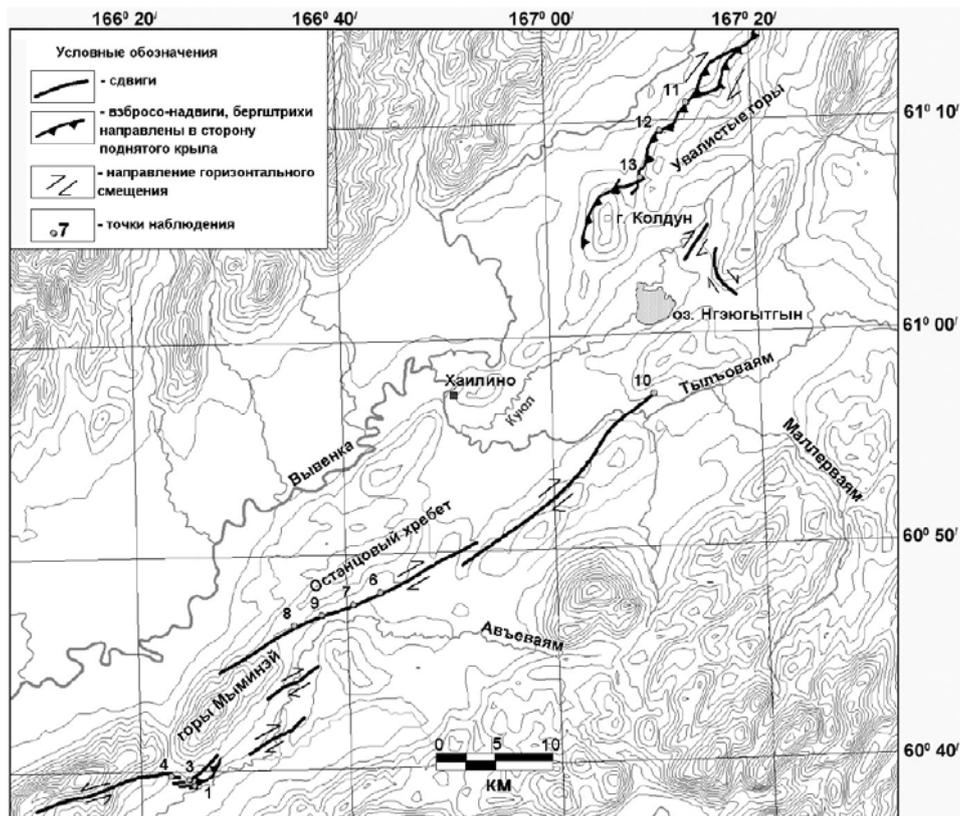


Рис. 2. Схема строения зоны сеймотектонических нарушений Олюторского землетрясения из [5]

Макросейсмическому воздействию подверглась территория порядка 400 тыс. км². Землетрясение ощущалось в 31 населенном пункте на территории Корякского автономного округа и прилегающих к нему районах Камчатской и Магаданской областей. Для жителей поселков, расположенных в эпицентральной зоне, оно стало катастрофическим, хотя жертв среди населения не было.

В зону максимальных сотрясений попали три поселка Корякского автономного округа – Хаилино, Корф и Тилички.

Пос. *Хаилино* ($\Delta=28$ км) попало в зону главного сейсморазрыва (рис. 2). На его территории наблюдались трещины шириной более 10 см в направлении с юго-востока на северо-запад, что позволяет классифицировать их как оперяющие магистральный разрыв. Обнаружены также вторичные сейсмодислокации в виде грифонов, сеймовибрационных трещин с изливом грязи.

По словам местных жителей, вначале были слышны удары, лязг, потом пошла волна по земле высотой более 40 см и гул из земли с грохотом. Люди в панике выбегали из домов, падая и с трудом удерживаясь на ногах. Дома подпрыгивали и грохотали, падали дымовые трубы и кирпичные печи. Поскольку в поселке преимущественно одно-двухэтажные деревянные дома из бруса, обшитые тонкими досками, то ни полного, ни частичного разрушения зданий не произошло. Отмечено значительное повреждение зданий, расположенных на заболоченных местах, фундаменты которых разорваны трещинами в грунте. В результате анализа всех собранных сведений о проявлении Олюторского землетрясения в пос. Хаилино значение интенсивности сотрясений было принято равным $I=8-9$ баллов [5, 17, 18].

В пос. *Тилички* ($\Delta=95$ км) образовалось большое число трещин в грунте шириной от 3–10 см, глубиной до 1 м и более. Многие из них подходили к фундаментам зданий, нарушая их целостность. Трещины приурочены к прибрежной части поселка и к участкам ухудшенных грунтовых условий. Сильные повреждения зданий приурочены именно к таким участкам. По трещинам наблюдалось излияние грязи. Поверхность косы в 6 км к северу от поселка имеет вид битой тарелки – множество трещин, выбросы песка, вдоль косы Торос.

Падение дымовых труб встречалось намного чаще, чем в пос. Хаилино. Благодаря деревянной брусовой застройке полного обрушения зданий зафиксировано не было. Значительно

пострадали здания, построенные из цементных блоков, не имеющие достаточной степени защиты от сейсмических воздействий.

Жители поселка ощущали землетрясение как три сильных толчка. Люди теряли равновесие, падали как в зданиях, так и снаружи. На улице был слышен скрип зданий и видно их раскачивание. Тяжелая мебель внутри домов падала и сдвигалась с места. Землетрясение ощущали люди, едущие в машинах. На основании собранных сведений о реакции зданий и сооружений, поведении людей, а также геологических эффектах, наблюдаемых в пос. Тилички, интенсивность сотрясений в этом пункте принята равной $I=8-9$ баллов [4, 5, 17, 18].

В пос. Корф ($\Delta=101$ км), расположенном значительно дальше от эпицентра, чем пос. Хаилино, макросейсмический эффект был существенно выше.

Во время землетрясения на Корфской косе, где расположен поселок, образовалось множество трещин шириной от нескольких сантиметров до 1–1.5 м и протяженностью до многих сотен метров. Глубина трещин не превышала 1–2 м.

Землетрясение вызвало всеобщую панику. Люди, испуганные сильными колебаниями, с трудом выбегали на улицы, многие падали. Еще большее потрясение они испытали, когда на их глазах в грунте стали образовываться трещины, которые то расширялись, то сужались, и из них появились грязевые фонтаны. Фонтаны воды высотой до 1–2 м образовались в море и в бухте. Позже вода в море стала мутной, как молоко.

Многочисленные зияющие трещины, обнаруженные после землетрясения, ориентированы вдоль простирания Корфской косы. Число трещин нарастает по направлению к берегу. В результате горизонтального смещения произошло снижение уровня почвы в районе ул. Береговой. В период прилива вода достигает фундаментов жилых зданий. Все жилые дома, объекты социальной сферы (кроме детского сада) не подлежат восстановлению. Получили сильные повреждения дизельная электростанция, семь из десяти котельных, повреждена тепло-трасса, линии электропередачи, разрушена взлетно-посадочная полоса [4, 5, 17, 18].

Интенсивность сотрясений в пос. Корф составила $I=9$ баллов.

Столь сильный макросейсмический эффект в пос. Тилички и Корф, более удаленных от инструментального эпицентра ($\Delta=95$ км и $\Delta=101$ км), чем пос. Хаилино ($\Delta=28$ км), связан в основном не с сейсмическими колебаниями на поверхности, а с вторичными сейсмодислокациями – вибрационными трещинами, просадками грунта и др. Вторичные грунтовые эффекты возникли на участках, где почвенные и грунтовые воды располагаются вблизи поверхности. Дома и сооружения в пос. Тилички и Корф, расположенные в прибрежной полосе и на морской косе, построены на неблагоприятных грунтах, что привело к увеличению макросейсмического эффекта от землетрясения [5, 18]. Не исключено также и влияние направленности излучения, наблюдаемого в очаге землетрясения (рис. 3).

Перечень населенных пунктов с указанием макросейсмической интенсивности в них, и расстояний до инструментального эпицентра Олюторского землетрясения приведен в табл. 3, а карта пунктов-баллов – на рис. 3. Описание макросейсмических проявлений Олюторского землетрясения, зафиксированных в пунктах табл. 3, приведено в [17]. Многочисленные афтершоки, которые последовали за главным толчком, также ощущались в населенных пунктах КАО. Наиболее сильные из них вызвали в пос. Тилички, Корф и Хаилино повторные сотрясения с интенсивностью $I=6-7$ баллов и привели к дополнительным разрушениям [17].

Таблица 3. Макросейсмические сведения об Олюторском землетрясении 20 апреля 2006 г.
с $K_S=15.7$, $M_w=7.6$

№	Пункт	Δ , км	№	Пункт	Δ , км
	<u>более 9 баллов</u>			<u>7–8 баллов</u>	
1	Переправа на р. Авьенваям	58	6	Усть-Вывенка	134
	<u>9 баллов</u>		7	Вывенка	137
2	Корф	101		<u>7 баллов</u>	
	<u>8–9 баллов</u>		8	Левтыриновьям	62
3	Хаилино	28	9	Ледяное	73
4	Переправа на р. Вывенка	70		<u>6–7 баллов</u>	
5	Тилички	95	10	Пахачи	107

№	Пункт	Δ, км	№	Пункт	Δ, км
11	Таловка	124	26	Маяк Карагинский	343
12	Алука	134		<u>4–5 баллов</u>	
13	Ильпырский	208	27	Лесная	412
	<u>6 баллов</u>		28	Палана	463
14	Каменское	176		<u>3–4 балла</u>	
15	Тымлат	286	29	Верхний Парень	323
16	Аянка	306		<u>2 балла</u>	
17	Карага	319	30	Усть-Камчатск	601
	<u>5–6 баллов</u>			<u>Ощущалось</u>	
18	Ачайваям	169	31	Средние Пахачи	93
19	Оклан	198		<u>Не ощущалось</u>	
20	Манилы	201	32	Воямполка	539
21	Слаутное	245	33	Крутоберегово	591
22	Оссора	307	34	Тигиль	610
23	Ивашка	393	35	Седанка	631
	<u>5 баллов</u>		36	Ключи	643
24	Парень	278	37	Никольское	649
25	Кострома	316			

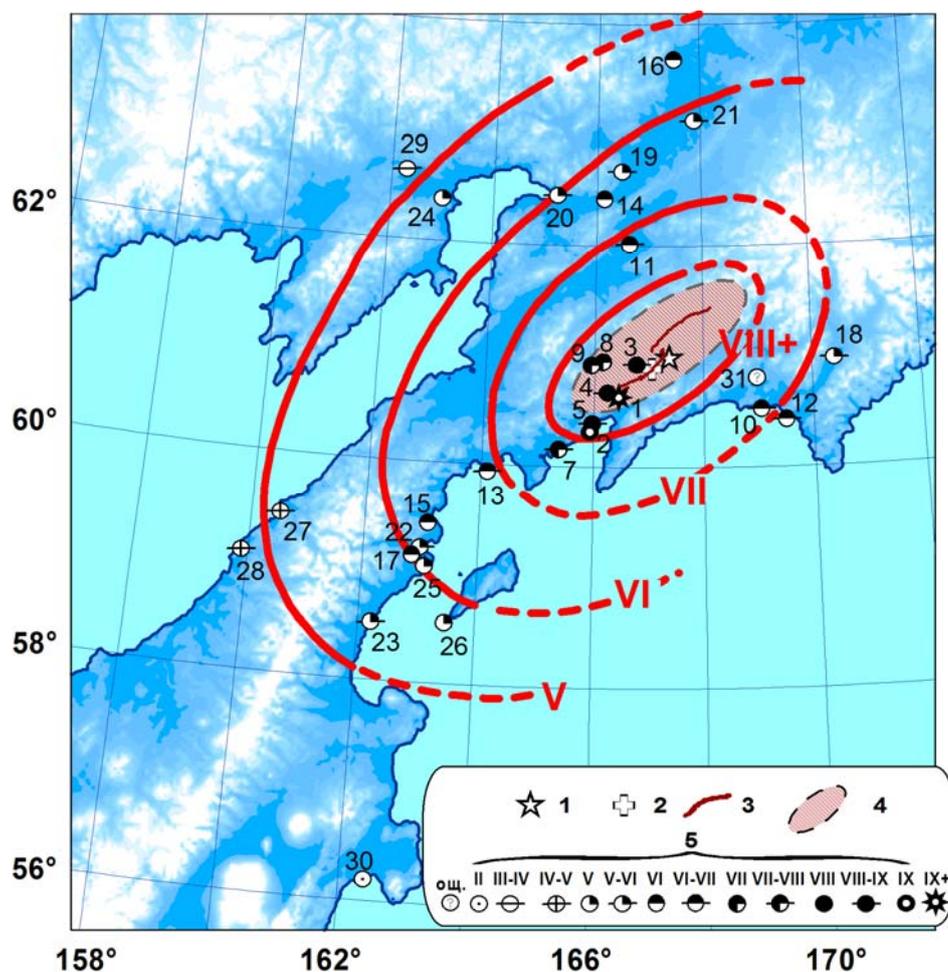


Рис. 3. Карта изосейст Олюторского землетрясения 20 апреля в 23^h24^m с $M_w=7.6$

1 – инструментальный эпицентр по данным КФ ГС РАН [1]; 2 – центр тяжести излучателя по [21]; 3 – сейсморазрывы по [4, 5]; 4 – очаговая зона землетрясения по распределению афтершоков [22, 23]; 5 – интенсивность сотрясений в баллах по шкале MSK=64 [5]; номера на карте соответствуют таковым в табл. 3.

В связи с отсутствием достаточного количества данных, изосейсты Олюторского землетрясения построены довольно схематично: не проведены изосейсты высокой балльности – девять и более баллов, отсутствуют изосейсты менее пяти баллов. Изосейсты на карте сильно сглажены также из-за малого объема данных. Наблюдается вытянутость их в направлении с юго-запада на северо-восток, вдоль простирания тектонических структур Корякского нагорья. Направление вытянутости изосейст совпадает с направлением большой оси очагового эллипса, очерченного облаком афтершоков главного землетрясения (рис. 3).

Корякское нагорье, где произошло Олюторское землетрясение, долгое время считалось довольно асейсмичным районом. По существующей на начало 90-х гг. карте сейсмического районирования территории СССР (ОСР-78) территория Корякского нагорья относилась к зоне 5–6-балльных сотрясений [24]. Произошедшее 8 марта 1991 г. Хаилинское (Корякское) землетрясение с $M_w=6.6$ [25] вызвало в поселках Олюторского района сотрясения с интенсивностью $I=7-8$ баллов. В новой карте сейсмического районирования России (ОСР-97-А) Корякское нагорье переведено в зону восьмibalльной интенсивности сотрясений [26]. Однако макросейсмический эффект Олюторского землетрясения превысил ожидаемую интенсивность, по крайней мере на один балл. В некоторых поселках КАО сотрясения достигали интенсивности $I=9$ баллов.

Сейсмичность очага Олюторского землетрясения. Олюторское землетрясение сопровождалось интенсивным афтершоковым процессом, который не был завершен к концу 2006 г. Каталог афтершоков Олюторского землетрясения [14] содержит основные параметры 2911 событий с $K_S=3-15.7$ и включает в себя более детальный подкаталог, составленный в период работы временных станций, установленных в эпицентральной зоне 2–18 мая [13]. Графики повторяемости землетрясений этих каталогов представлены на рис. 4.

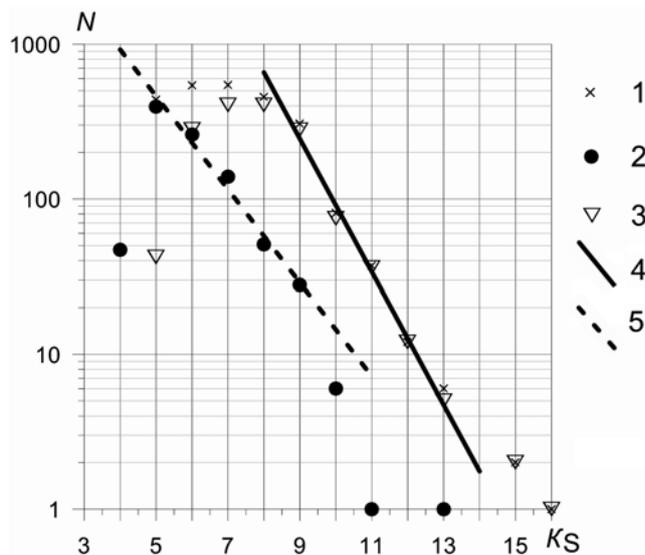


Рис. 4. Графики повторяемости для различных частей каталога афтершоков Олюторского землетрясения

1 – все землетрясения 2006 г.; 2 – период времени 2–17 мая; 3 – каталог за периоды времени 20.04.–01.05 и 18.05–31.12.; 4, 5 – линии регрессии для графиков 2 и 3, рассчитанные для $\Delta K_S=5-9$ и $K_S=9-12$ соответственно.

Из рис. 4 видно, что для всего каталога, также как и для выборочного каталога за периоды времени, когда не было временных станций, уровень надежной регистрации составляет $K_{\min}=9$ ($K_S \geq 8.6$), а для локального подкаталога он значительно ниже и составляет $K_{\min}=5$. Исходя из полученных графиков при исследовании сейсмичности очаговой зоны все временные зависимости построены для землетрясений с $K_S \geq 8.6$, а пространственные распределения – для событий с $K_S \geq 5.0$.

За развитием афтершокового процесса можно проследить по рис. 5, где представлено распределение числа афтершоков во времени от начала главного события (по часам и суткам), а также временная зависимость сейсмической энергии, выделявшейся в очаговой зоне Олюторского землетрясения в течение первых 40 дней, начиная с момента главного толчка. Кумулятивные

графики высвобождения сейсмической энергии (рис. 5 а, б) нормированы на значение $\Sigma E=59.92 \cdot 10^{15}$ Дж – величину выделившейся в очаговой зоне энергии в течение 2006 г.

В течение 2006 г. в очаговой зоне произошло 446 землетрясений с $K_S \geq 8.6$, из них 20 событий имеют $K_S=11.6-14.7$. Как следует из рис. 5 в, г, в течение первых 12 часов афтершокового процесса до первого относительного затишья произошло 144 землетрясения, в последующие 88 часов было зафиксировано 91 событие с $K_S \geq 8.6$. Следующее затишье наблюдалось

на пятые сутки после главного толчка, а затем – на одиннадцатые. Значительная сейсмическая активизация, связанная с сильнейшим ($K_S=14.7$, $M_w=6.6$) афтершоком 22 мая в 11^h11^m (24), наблюдалась на 33–39 сутки. За первые 40 суток от момента главного толчка в очаговой зоне произошло 376 событий, или 84% от общего числа землетрясений с $K_S \geq 8.6$, из них 18 – сильные. Далее в течение года было зарегистрировано 69 землетрясений (16%).

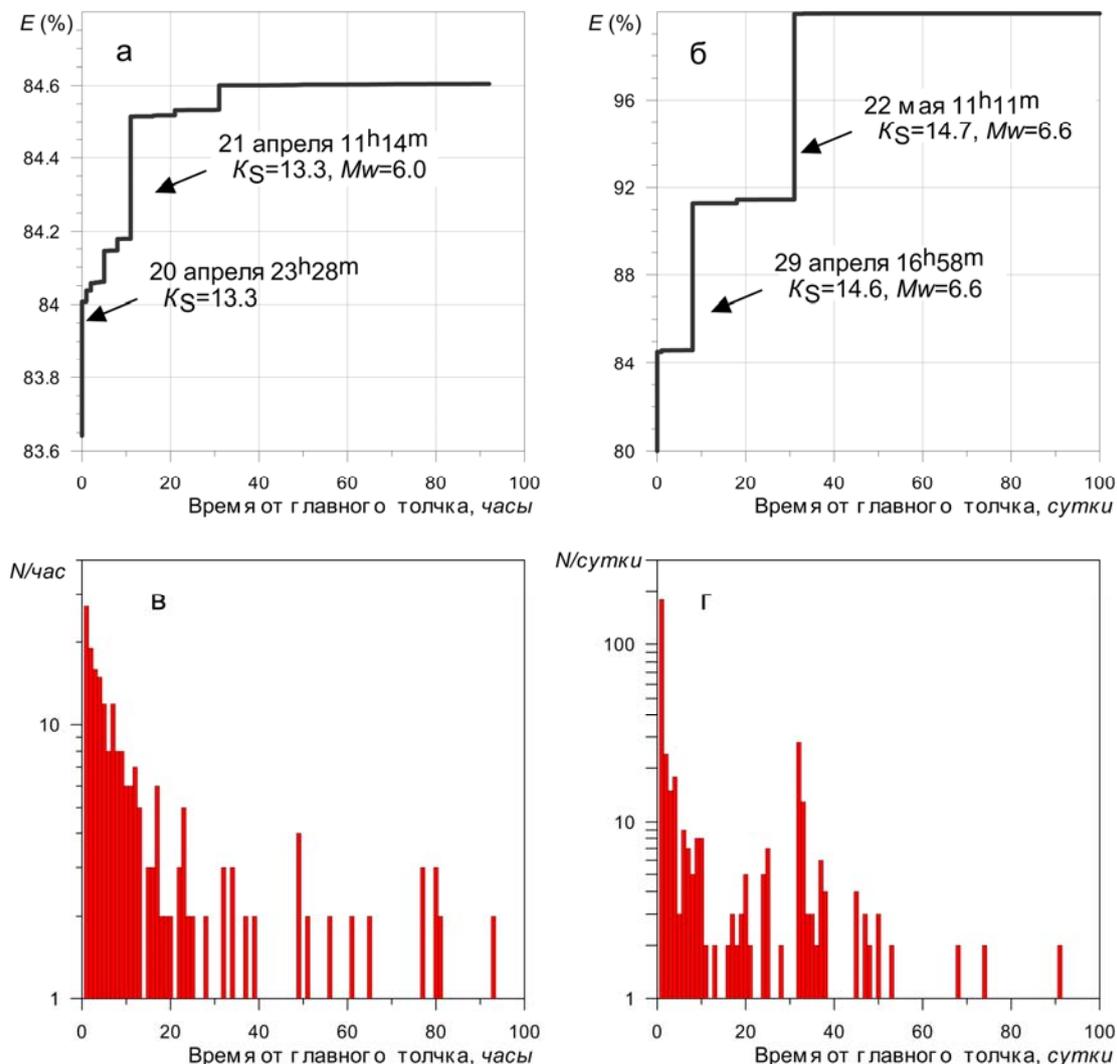


Рис. 5. Графики высвобождения сейсмической энергии в очаге Олюторского землетрясения (а, б) и распределение частоты появления афтершоков с $K_S \geq 8.6$ (в, г)

а, в – почасовые распределения, начиная с момента главного события, б, г – посуточные. Графики (а) и (б) нормированы на полное значение сейсмической энергии $\Sigma E=59.92 \cdot 10^{15}$ Дж, высвобожденной в очаге землетрясения в течение 2006 г.

Первая значительная ступень на графике высвобождения сейсмической энергии (рис. 5 а) приходится на момент главного толчка, когда высвободилось 83.6% от полного значения сейсмической энергии очаговой зоны в 2006 г. Следующие ступени на рис. 5 а соответствуют моментам возникновения сильных афтершоков первых суток активности после главного толчка (10 и 17), произошедших 20 апреля в 23^h28^m с $K_S=13.3$ и 21 апреля в 11^h14^m с $K_S=13.3$, $M_w=6.0$. Две ступени на посуточном графике высвобождения сейсмической энергии (рис. 5 б) соответствуют моментам возникновения сильнейших афтершоков (21 и 24), произошедших 29 апреля в 16^h58^m с $K_S=14.6$, $M_w=6.6$ и 22 мая в 11^h11^m с $K_S=14.7$, $M_w=6.6$.

Карта эпицентров афтершоков очаговой зоны за 2006 г. представлена на рис. 6 а, где показаны все землетрясения, вошедшие в каталог [14]. Положение сильных землетрясений в очаговой области показано на рис. 6 б.

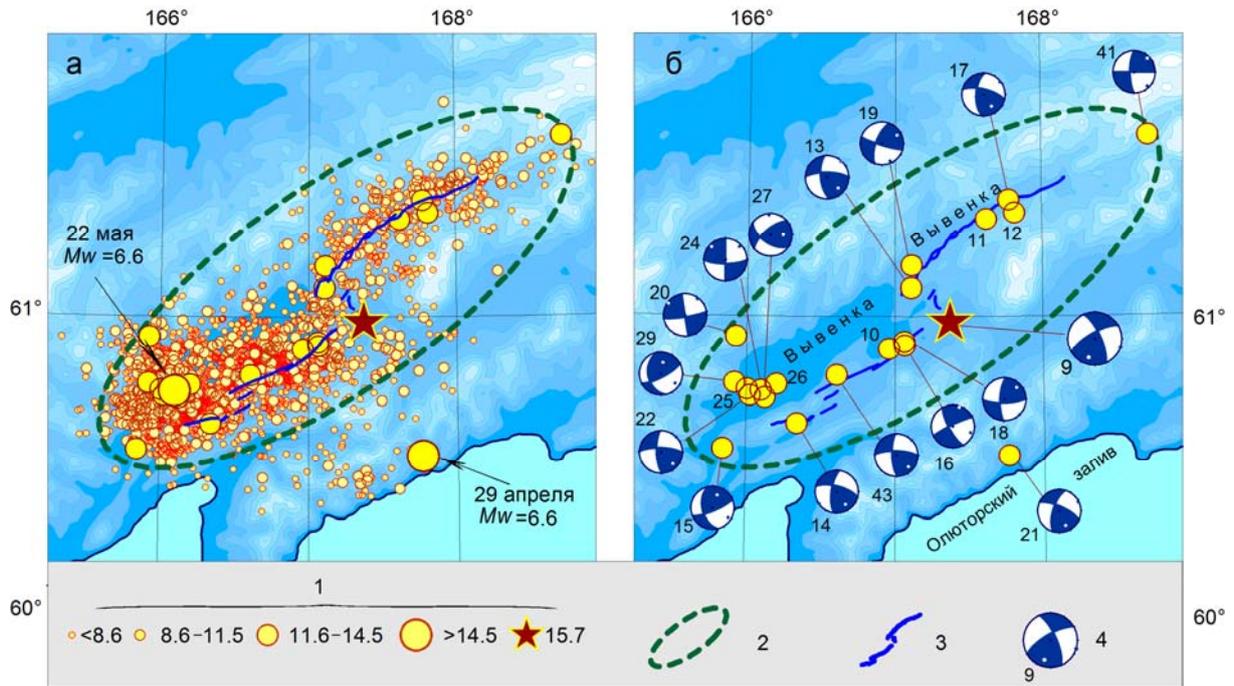


Рис. 6. Карта эпицентров всех афтершоков Олюторского землетрясения в 2006 г. из [13] (а) и с $K_S \geq 11.6$ (б)

1 – энергетический класс K_S ; 2 – очаговая зона землетрясения по распределению афтершоков [22, 23]; 3 – сейсморазрывы по [4, 5]; 4 – диаграмма механизма очага по данным [9] в проекции нижней полусферы; номера землетрясений на фрагменте (б) соответствуют таковым в каталоге [1].

Главное землетрясение (9) произошло 20 апреля в 23^h25^m в центре будущей очаговой зоны. Через 3 минуты 20 апреля в 23^h28^m в 25 км юго-западнее последовал первый сильный ($K_S=13.3$, $MPSP=6.0$) афтершок (10), а в последующие 10 минут еще два сильных события (11 и 12) в 23^h34^m с $K_S=11.8$, $MPSP=5.1$ и в 23^h38^m с $K_S=11.8$, $MPSP=5.4$, но уже к северо-востоку от главного толчка. В течение первых 30 минут афтершоковым процессом было охвачено 75% протяженности будущей очаговой области, при этом афтершоки мигрировали вдоль ее простираения, от центра к краям (рис. 6 б). К 30-й минуте расстояние между крайними афтершоками составляло уже 155 км. В течение первого часа афтершоковым процессом была охвачена площадь размером около 160x40 км. Наиболее интенсивный период активности очага пришелся на первые двенадцать часов (рис. 5 в). За это время произошло 144 афтершока с $K_S=8.6-13.3$, из них 8 сильных с $K_S \geq 8.6$, и очаговая область оформилась практически полностью. Необходимо отметить, что в первые минуты после главного толчка идентификация слабых событий была затруднена высоким уровнем помех на сейсмограммах, поэтому число произошедших землетрясений может быть занижено. Заключением первого этапа стал сильный ($K_S=13.3$, $M_w=6.0$) афтершок (17), произошедший 21 апреля в 11^h14^m на северо-восточном краю очаговой зоны. В последующие 12 часов произошло 34 землетрясения, из них одно сильное – 21 апреля в 20^h50^m с $K_S=11.9$, $M_w=5.0$ (18). В последующие семь суток афтершоки продолжали заполнять уже оформившуюся очаговую область. Исключение составляет сильное землетрясение (21), которое произошло на девятые сутки после главного толчка 29 апреля в 16^h58^m с $K_S=14.6$, $M_w=6.6$. Это событие произошло в стороне от основной очаговой зоны на параллельных ей структурах – в 60 км к юго-востоку от эпицентра основного толчка (рис. 6 б). Поэтому, возможно, его следует рассматривать не как афтершок Олюторского а как независимое событие. Событие (21) имело единственный достаточно сильный ($K_S=10.6$, $MPSP=5.1$) собственный афтершок 1 мая в 00^h02^m и несколько более слабых.

Наиболее активна на протяжении мая была юго-западная часть очага. Здесь 9 мая произошло землетрясение (22) в 11^h02^m с $K_S=13.0$, $M_w=5.7$, а затем прошла серия событий, которая началась 22 мая в 11^h11^m самым сильным ($K_S=14.7$, $M_w=6.6$) афтершоком (24). За землетрясением (24) в его окрестности последовала серия достаточно сильных толчков (25–27, 29) с максимальным классом $K_S=12.6$, $MPSP=5.4$ (27), но она продолжалась всего неделю.

Как видно из рис. 6 а, основная масса афтершоков располагается в окрестности зоны сеймотектонических нарушений, протянувшейся вдоль юго-восточного борта долины р. Вывенки [5, 8]. Исключение составляет юго-западная часть зоны, где выделяется поперечная структура, переходящая на противоположный борт долины Вывенки (рис. 5 б). Осевая часть очаговой зоны имеет сигмообразную, вытянутую на северо-восток форму. Однако для ее простейшего описания традиционно используется простейшая эллиптическая аппроксимация. В этом грубом приближении основная часть зоны, где произошло подавляющее большинство (93%) афтершоков, имеет размеры 205x75 км и простирается большой осью 55° (пунктирный эллипс на рис. 6).

Глубина 99% афтершоков не превосходит 35 км [14]. Однако для большинства событий она определена весьма неточно, что связано с удаленностью станций. Исключение составляют события, для локации которых использовались данные временных станций, располагавшихся в пределах эпицентральной зоны. Значения глубин этих землетрясений не превышают 20 км.

Механизмы очагов главного события и афтершоков определены для 16 землетрясений с энергетическим классом $K_s \geq 11.6$ и имеющих не менее 25 знаков первых вступлений P -волны. Расчеты механизмов главного события и афтершоков, происходивших в очаговой зоне Олюторского землетрясения, проводились по стандартной методике КФ ГС РАН, основанной на знаках смещений в первых вступлениях P -волн [10, 27, 28]. Использовались сейсмограммы станций Камчатской региональной сети, а также бюллетени ISC [2] и ежедекадный бюллетень ГС РАН [8]. Полученные решения механизмов представлены в каталоге [9], а их пространственное распределение в пределах очаговой зоны – на рис. 6 б. Все механизмы относятся к двум типам: взбросам и сдвигам. С учетом выбора 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.

По данным полевых наблюдений [4, 5], очаг Олюторского землетрясения обладает сложной и неоднородной структурой. Механизм подвижки вдоль магистрального сейсморазрыва изменяется от чистого взброса и взбросо-сдвига до сдвига со сбросовой компонентой. На большей части сейсморазрыва сдвиговые смещения правосторонние. В области главного эпицентра происходит смена преобладающего типа подвижки. Юго-западнее эпицентра наблюдаются в основном правые сдвиги, севернее и северо-восточнее преобладают взбросовые движения (рис. 2).

Подобная картина приблизительно соответствует и описанной выше форме облака афтершоков, но несколько не соответствует распределению типов подвижек, полученных по знаковой методике определения механизмов очага (рис. 6 б) [9]. Более согласованная картина наблюдается по длиннопериодным оценкам тензора сейсмического момента, полученным в Гарварде [21]. Диаграммы ближайшего двойного диполя к тензору сейсмического момента СМТ-каталога приведены на рис. 7.

Как видно из рис. 7, на северо-восточном краю очаговой зоны наблюдается преимущественно взбросовый тип подвижки, в то время как в механизмах юго-западного края преобладают сдвиги, что неплохо согласуется с полевыми наблюдениями (рис. 2).

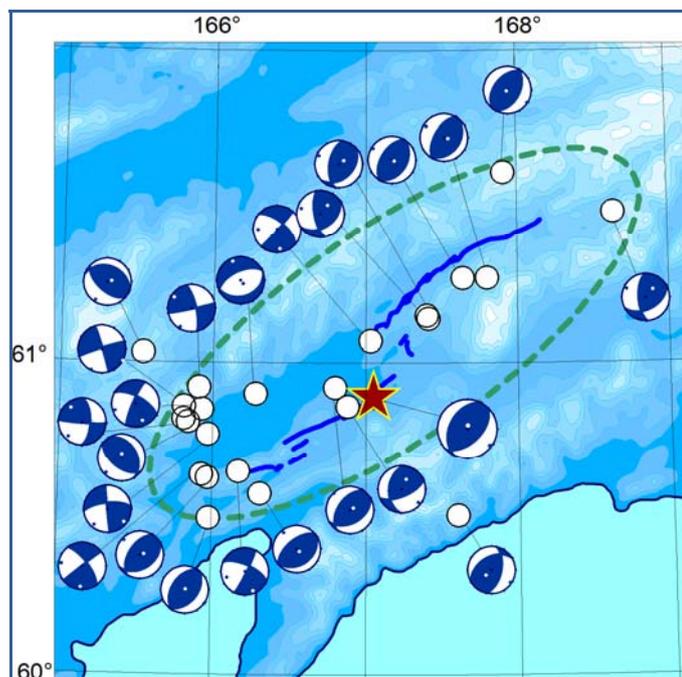


Рис. 7. Карта эпицентров афтершоков Олюторского землетрясения в 2006 г. каталога СМТ [21] и стереограммы ближайшего двойного диполя к тензору сейсмического момента

Тектоническая позиция очага и сейсмическая история. Олюторское землетрясение произошло на юге Корякского нагорья, в Корякском сейсмическом поясе, протянувшемся по континентальным и шельфовым областям вблизи азиатского побережья Берингова моря, и ограничивающем с запада и северо-запада литосферную плиту Берингию [29], отделяя ее от Северо-Американской плиты (рис. 8). Согласно кинематической модели движения Берингии, граница плит в районе эпицентра землетрясения имеет конвергентный характер с праводвиговой составляющей. Движения подобного типа преобладали и в очаге Олюторского землетрясения.

До 90-х гг. XX в. сейсмичность Корякского пояса была практически неизвестна. 22 ноября 1969 г. примерно в 200 км севернее границ Тихоокеанской плиты в акватории Командорской котловины Берингова моря произошло сильное Озерновское землетрясение $M=7.7$ [30], теперь также относимое к этому поясу. Однако севернее в Корякском нагорье землетрясения в то время почти не регистрировались [22]. Ретроспективный взгляд на тот период, учитывающий последующие события, позволяет распознать в редкой сейсмичности элементы известного сегодня Корякского сейсмического пояса. Однако в то время данных было недостаточно.

Даже небольшая активизация Корякского нагорья во второй половине 80-х гг. на фоне общей сейсмичности северо-востока Азии и, тем более, Камчатки почти не привлекла к себе внимания исследователей [22]. Поэтому для сейсмологов оказалось неожиданным Хаилинское землетрясение 08.03.1991 г. с $M_w=6.6$ [25], произошедшее в пустой на карте сейсмичности области, и почти на единицу магнитуды превосходившее все предыдущие события Корякского нагорья. Исследования Хаилинского землетрясения позволили выделить непрерывную полосу сейсмичности, протянувшуюся от стыка Камчатской и Алеутской сейсмофокальных зон к северо-востоку через западный шельф Берингова моря и Корякское нагорье к Чукотскому п-ову, и составившую Корякский сейсмический пояс [29] (рис. 9). Вдоль осевой линии нагорья была выделена Хатырско-Вывенская зона разломов, к которой тяготеет большинство эпицентров землетрясений региона.

Олюторское землетрясение произошло через 15 лет после Хаилинского практически в той же точке, однако значительно превзошло последнее по магнитуде, интенсивности сотрясений и размеру очага. Оба эпицентра располагаются в районе, где Хатырско-Вывенская зона разломов пересекает систему Вывенской и Пылговаямской четвертичных депрессий и имеет флексуорообразный изгиб [20]. Однако, если очаг Хаилинского землетрясения ограничен этим районом, то Олюторское вскрыло Хатырско-Вывенскую зону по обе стороны от эпицентра на протяжении 150 км. Возможно, что Хаилинское событие может рассматриваться как начало (форшок) значительно более масштабного Олюторского процесса [31].

Сильные движения грунта от Олюторского землетрясения и его афтершоков получены по записям цифровых широкополосных станций Камчатской региональной сети «Каменское», «Крутоберегово», «Беринг», «Петропавловск». По полученным данным об основном толчке и афтершоках была построена средняя зависимость максимальных ускорений и скоростей грунта от магнитуды и расстояния. Впервые важными особенностями колебаний грунта при землетрясениях на малоизученной территории Корякии явились сдвиг спектра ускорений в сторону низких частот и необычно низкие (для фиксированных расстояния и магнитуды) значения макси-



Рис. 8. Мозаика плит северной окраины Тихого океана

1 – границы плит и сейсмические пояса; 2 – инструментальный эпицентр Олюторского землетрясения; 3 – зоны рассеянной сейсмичности.

мальных ускорений. Подробные сведения о записях сильных движений, их анализе и применяемых методиках изложены в [32, 33].

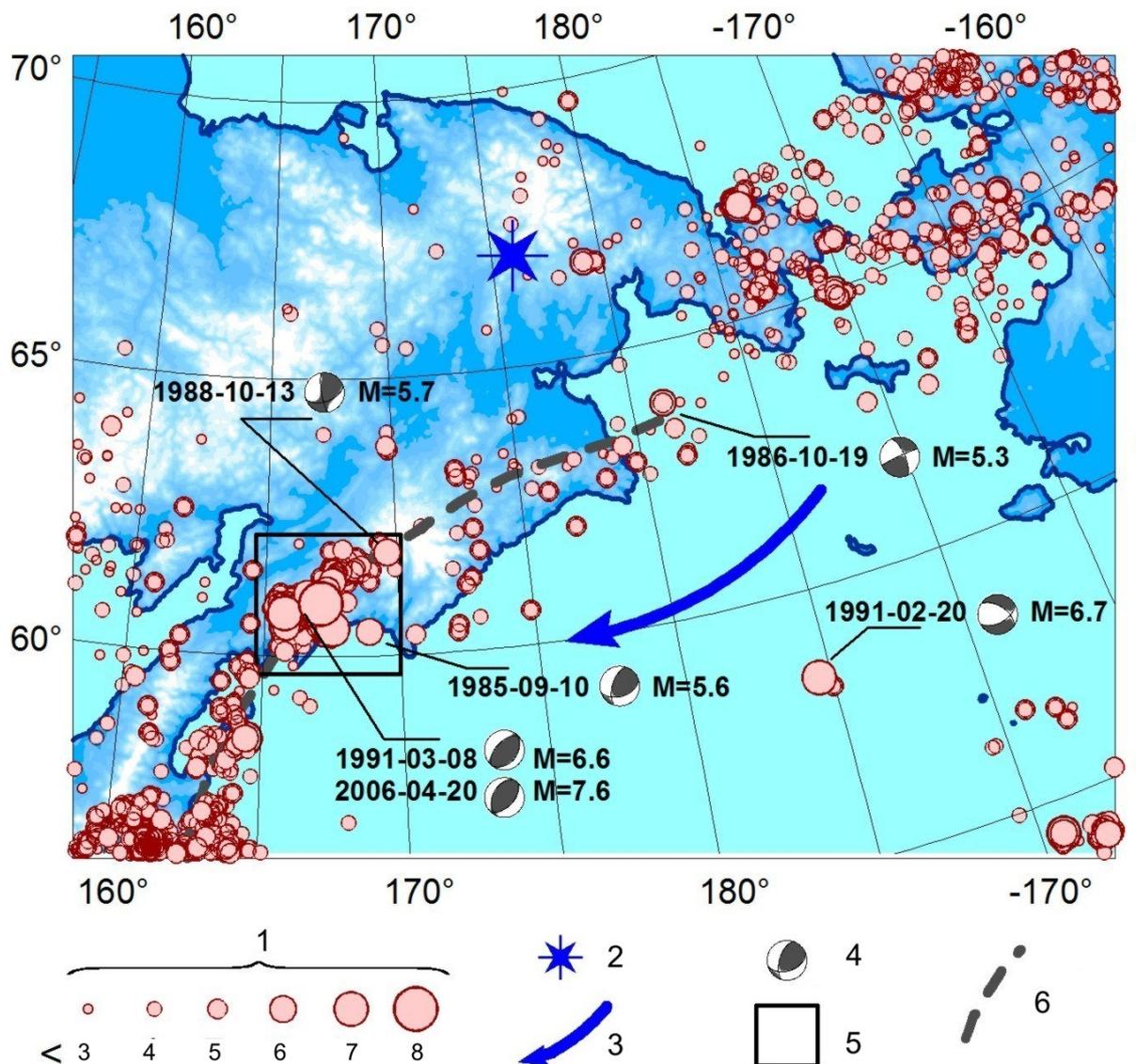


Рис. 9. Сейсмичность северо-западной окраины Берингова моря за 1985–2006 гг.

1 – магнитуда M ; 2, 3 – полюс и направление вращения плиты Берингии относительно Северо-Американской плиты [29]; 4 – стереограммы механизмов землетрясений по [21]; 5 – эпицентральная зона Олюторского землетрясения; 6 – Корякский сейсмический пояс.

Деформационные процессы. Олюторское землетрясение – третье значительное событие, для которого Камчатская сеть GPS-станций зарегистрировала заметные смещения земной коры. Камчатская региональная сеть GPS-станций KAMNET была создана в 1997 г. [34] с целью определения глобальных движений тектонических блоков, регистрации смещений земной коры, возникающих от сейсмических событий. В первый же год ее функционирования 05.12.1997 г. в Кроноцком заливе произошло сильное ($M_w=7.8$) землетрясение, деформации от которого были зафиксированы всей сетью станций [35]. Косейсмические деформации, связанные с Командорским-II землетрясением 05.12.2003 г. ($M_w=6.6$), были зафиксированы на двух станциях сети KAMNET [36]. В момент Олюторского землетрясения в составе сети работало 14 станций постоянных наблюдений (рис. 10). На двух из них – «Каменское» (KMS) и «Тиличики» (TIL), наблюдались косейсмические смещения от основного события, а на пункте TIL были зафиксированы деформации еще и от сильнейшего ($M_w=6.6$) афтершока 22 мая 2006 г. (24) (рис. 10, 11).

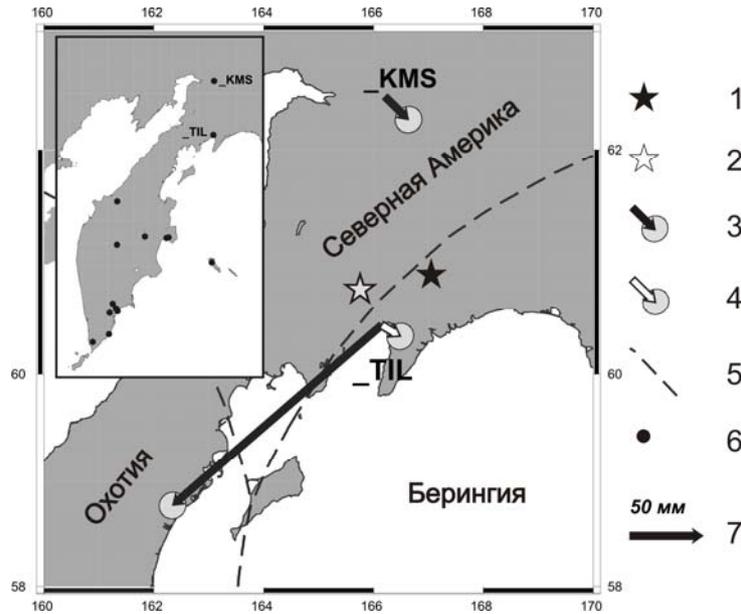


Рис. 10. Косейсмические смещения, зарегистрированные станциями сети КАМNET от Олюторского землетрясения

1, 2 – инструментальный эпицентр главного толчка 20 апреля 2006 г. ($M_w=7.6$) и афтершока 22 мая 2006 г., ($M_w=6.6$) соответственно; 3, 4 – вектор косейсмического смещения с эллипсом ошибок от основного события и афтершока соответственно; 5 – предполагаемые границы тектонических блоков; 6 – пункты GPS-сети; 7 – масштаб векторов косейсмического смещения. На врезке показаны постоянные пункты GPS-наблюдений сети КАМNET по состоянию на 20 апреля 2006 г.

На рис. 11 показаны временные ряды наблюдаемых деформаций на пунктах «Тилички» и «Каменское». Косейсмические смещения для основного события определялись как разность между положениями пунктов в моменты времени 23^h 21 апреля 2006 г. и 23^h 20 апреля 2006 г., для афтершока – как разность положений пунктов 23 мая 2006 г. и 21 мая 2006 г. Для более точного определения косейсмического смещения обработка GPS-наблюдений выполнялась относительно предварительно определенной локальной отчетной основы без привязки к глобальной отчетной основе ITRF. При обработке данных применялся пакет GAMIT/GLOBK [37, 38].

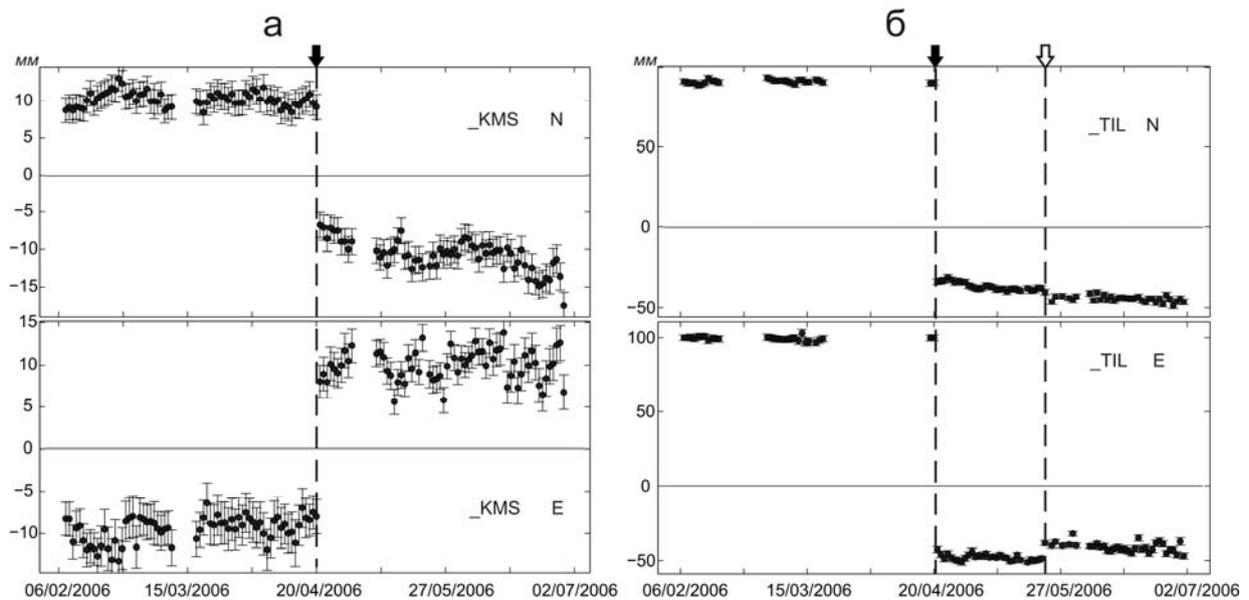


Рис. 11. Временные ряды зафиксированных косейсмических смещений с 6 февраля по 2 июля 2006 г.; а, б – горизонтальные составляющие по станциям «Каменское» (KMS) и «Тилички» (TIL) соответственно; темными стрелками и пунктиром отмечен момент основного события; светлыми и пунктиром – афтершока.

Полученные данные наблюдений сети KAMNET за период 1997–2006 гг. позволили сделать выводы о движении Берингоморской и Североамериканской плит в районе Олюторского землетрясения. Относительное перемещение плит в районе пос. Тилички определено как правосторонний сдвиг со скоростью $v=15$ мм/год [39]. Данные о косейсмическом скачке GPS-пунктов проинтерпретированы в рамках модели дислокационного источника в упругом пространстве. Получены оценки параметров очага: ориентация площадки разрыва – $STK=44^\circ$, $DP=51^\circ$; размеры – $L=108$ км, $W=30$ км, средняя подвижка $u=3.2$ м [39].

В заключение отметим, что Олюторское землетрясение произошло в Корякском сейсмическом поясе в месте сочленения трех плит – Североамериканской, Охотоморской и Берингоморской. Это сильнейшее за инструментальный период межплитовое событие северо-западной окраины Берингова моря. Очаг землетрясения вышел на поверхность в виде системы сейсморазрывов общей длиной около 140 км. Макросейсмический эффект землетрясения зафиксирован на площади около 400000 км². В плейстосейстовой зоне наблюдались многочисленные вторичные дислокации: разжижение грунта, трещинные излияния водно-песчаной смеси, грифоны, грязевые вулканы. Сильно пострадали три поселка, находящиеся в эпицентральной зоне. Землетрясение сопровождалось многочисленными афтершоками (в 2006 г. $N_{\Sigma}=2911$ [14]), которые концентрировались вблизи наблюдавшихся на поверхности сейсморазрывов. Распределение подвижек в плейстосейстовой области, кинематика поверхностных сейсморазрывов показали, что очаг землетрясения обладает сложной неоднородной структурой. Северо-восточнее главного эпицентра преобладают взбросы, а к юго-западу от него – правые сдвиги; у юго-западного окончания зоны наблюдались левые сдвиги.

Правосдвиговой характер движения Берингоморской плиты в районе эпицентра землетрясения подтверждается и данными GPS-наблюдений сети KAMNET.

После Олюторского землетрясения Корякское нагорье следует рассматривать как область высокоопасной сейсмической активности, требующей пристального внимания и проведения детальных наблюдений на его территории.

Л и т е р а т у р а

1. Левина В.И., Шевченко Н.А. (отв. сост.), Антипова О.Г., 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 землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2006 г. ($N=1261$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
2. **Bulletin of the International Seismological Centre for 2006.** – Berkshire: ISC, 2008.
3. **Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье).** Первые результаты исследований / Отв. ред. В.Н. Чебров. – Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. – 290 с.
4. 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.
5. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Новиков С.С. Результаты геологического изучения эпицентральной области Олюторского землетрясения 20 (21) апреля 2006 г. // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 2. – С. 7–15
6. Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага). Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
7. Ландер А.В., Левина В.И. Методика обработки афтершоков Олюторского землетрясения 20 апреля 2006 г. с $M_w=7.6$. (См. раздел V (Методические вопросы) в наст. сб.).
8. **Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2006 год** / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2006–2007. – [Электронный ресурс]. – ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2006.
9. Иванова Е.И. (отв. сост.). Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2006 г. ($N=41$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
10. Федотов С.А., Зобин В.М., Гордеев Е.И., Иванова Е.И., Лепская Т.С., Митякин В.П., Синельникова Л.Г., Чиркова В.Н. Землетрясения Камчатки и Командорских островов // Землетрясения в СССР в 1985 году. – М.: Наука, 1988. – С. 155–169.

11. **Гусев А.А.** Определение гипоцентров близких землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. – 1979. – № 1. – С. 74–81.
12. **Кузин И.П.** Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. – М.: Наука. – 1974. – 145 с.
13. **Чебров В.Н., Сеников С.Л.** Сейсмологические наблюдения на территории Корякского автономного округа, оперативная обработка Олюторского землетрясения 20 (21) апреля 2006 г. с $M_w=7.6$ и его афтершоков // Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. – С. 7–13.
14. **Левина В.И., Шевченко Н.А. (отв. сост.), Бахтиярова 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., $M_w=7.6$ ($N=2911$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
15. **Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
16. **Лемзиков В.К., Гусев А.А.** Энергетическая классификация близких Камчатских землетрясений по уровню кода-волн // Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 4. – С. 83–97.
17. **Митюшкина С.В., Левина В.И., Раевская А.А.** Макросейсмическая оценка последствий Олюторского землетрясения 20 (21) апреля 2006 года // Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. – С. 34–53.
18. **Константинова Т.Г.** Макросейсмическое обследование последствий Олюторского землетрясения 20 (21) апреля 2006 года // Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. – С. 54–125.
19. **Федотов С.А., Шумилина Л.С.** Сейсмическая сотрясаемость Камчатки // Физика Земли. – 1971. – № 9. – С. 3–15.
20. **Ландер А.В., Пинегина Т.К.** Парадоксы очага Олюторского землетрясения 2006 г. – глубинная структура и динамика // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, 11–17 октября 2009 г. – Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. – С. 131–135.
21. **Global CMT catalog.** – [Электронный ресурс]. – <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
22. **Ландер А.В., Левина В.И., Иванова Е.И.** Олюторское землетрясение 20 (21) апреля 2006 г. $M_w=7.6$: сейсмическая история региона и предварительные результаты исследования серии афтершоков // Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. – С. 14–33.
23. **Ландер А.В., Левина В.И., Иванова Е.И.** Оценки параметров очага Олюторского землетрясения 20 апреля 2006 г., $M_w=7.6$ // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 2. – С. 16–30.
24. **Бунэ В.И., Горшков Г.П.** Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. – М.: Наука, 1980. – 307 с.
25. **Зобин В.М., Бахтияров 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.
26. **Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97.** Масштаб 1:8 000 000. Объяснительная записка. – М., 1999. – 57 с.
27. **Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов** (отчет за 01.01.2003–31.12.2003 г.). – Петропавловск-Камчатский: Фонды КФ ГС РАН, 2004. – 350 с.
28. **Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов** (отчет за 01.01.2005–31.12.2005 г.). – Петропавловск-Камчатский: Фонды КФ ГС РАН, 2006. – 478 с.
29. **Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дроздин 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.
30. **Федотов С.А., Гусев А.А., Зобин В.М., Кондратенко А.М., Чепкунас К.Е.** Озерновское землетрясение и цунами 22 (23) ноября 1969 г. // Землетрясения в СССР в 1969 году. – М.: Наука, 1973. – С. 195–208.

31. Ландер А.В., Левина В.И., Митюшкина С.В. Хаилинское землетрясение 1991 г. ($M=6.6$) – форшок Олюторского 2006 г. с $M=7.6$ (тектонофизический взгляд на проблему). Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. // Труды Второй региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, 11–17 октября 2009 г. – Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. – С. 136–140.
32. Гусев А.А., Чубарова О.С., Чебров В.Н., Абубакиров И.Р. Колебания грунта при Олюторском землетрясении 20 (21) апреля 2006 г. и его афтершоках по данным цифровой регистрации: предварительные результаты // Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Коряжское нагорье). Первые результаты исследований. – Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. – С. 263–276.
33. Чубарова О.С., Гусев А.А., Чебров В.Н. Свойства колебаний грунта при Олюторском землетрясении 20.04.2006 г. и его афтершоках по данным цифровой регистрации // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 2. – С. 57–70.
34. Левин В.Е., Гордеев Е.И., Бахтиаров В.Ф., Касахара М. Предварительные результаты GPS-мониторинга на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. – 2002. – № 1. – С. 3–11.
35. Левина В.И., Гусев А.А., Павлов В.М., Иванова Е.И., Левин В.Е., Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М., Гусева Е.М., Салтыков В.А., Зобин В.М. Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года с $M_w=7.8$, $I_0=8$ (Камчатка) // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. – Обнинск: ГС РАН, 2003. – С. 250–271.
36. Левина В.И., Чеброва А.Ю., Ландер А.В., Иванова Е.И., Митюшкина С.В., Титков Н.Н. Командорское-II землетрясение 5 декабря 2003 года с $M_S=6.8$, $I_0=7$ (Командорские острова) // Землетрясения Северной Евразии в 2003 году. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 374–381.
37. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. GAMIT Reference Manual. GPS Analysis at MIT // Release 10.4. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. 28 October 2010. – [Электронный ресурс]. – ftp://chandler.mit.edu/updates/documentation/GAMIT_Ref_10.4.pdf
38. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. GLOBK Reference Manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program //Release 10.4. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences. Massachusetts Institute of Technology, 28 October 2010. – [Электронный ресурс]. – ftp://chandler.mit.edu/updates/documentation/GLOBK_Ref_10.4.pdf
39. Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф., Павлов В.М., Титков Н.Н., Сероветников С.С. Геодинамические исследования Олюторского землетрясения 20 (21).04.2006 г. по данным Камчатской GPS-сети // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 3. – С. 50–59.