

ИЛЬПЫРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 13 марта 2013 г.с $M_{w\text{per}}=5.8$, $ML=6.2$, $K_S=13.9$, $I_0^p=8$ (Камчатский перешеек)Ю.А. Кугаенко¹, С.Я. Дрознина¹, В.А. Салтыков¹, В.М. Павлов¹,А.В. Ландер², С.В. Митюшкина¹, И.Р. Абубакиров¹¹Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, ku@emsd.ru²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия, land@mitp.ru

Аннотация. 13 марта 2013 г. в 03^h12^m в районе Камчатского перешейка произошло сильное ($M_w=5.8$, $ML=6.2$) мелкофокусное сейсмическое событие – Ильпирское землетрясение. Оно является сильнейшим для этого района за время детальных сейсмологических наблюдений. Максимальная интенсивность сотрясений, вызванных этим землетрясением, зафиксирована на расстоянии ~30 км и оценена как $I=6-7$ баллов по шкале MSK-64. Региональный механизм очага Ильпирского землетрясения был определен двумя независимыми методами: через инверсию широкополосных волновых форм региональных станций в тензор сейсмического момента (ТСМ) и по знакам первых вступлений продольных волн. Полученные результаты согласуются между собой: механизм очага Ильпирского землетрясения – взбросо-сдвиг с субгоризонтальной осью сжатия в направлении с северо-востока на юго-запад. Также были определены механизмы для двух сильнейших афтершоков, в результате чего выявлено изменение очаговых движений в ходе афтершокового процесса. Выполнен анализ афтершокового процесса Ильпирского землетрясения, который предлагается рассматривать как убывающий во времени поток сейсмических событий с двумя последовательными стадиями, имеющими разный характер затухания. Длительность процесса ~ 75 суток. Зарегистрировано около 200 афтершоков $ML=3.0-5.7$ ($K_S=7.5-12.9$), гипоцентры большинства из них (80 %) определены на глубине менее 10 км. Облако мелкофокусных афтершоков имеет размеры 48×12 км и вытянуто в направлении с северо-запада на юго-восток. Сильнейший афтершок с $ML=5.7$, $M_{w\text{per}}=4.8$, при котором проявилась смена типа подвижки в очаге, зарегистрирован 6 мая 2013 года. Обобщен опыт оперативной обработки афтершоковой последовательности, по результатам которой афтершоковое облако Ильпирского землетрясения обладало ярко выраженной линейностью и большой протяженностью, что оказалось артефактом. Основная причина возникновения артефакта – минимальное количество станций, участвующих в определении гипоцентров большинства афтершоков и их квазилинейное расположение. Построены доверительные области, в пределах которых решения практически равноценны. По итогам исследования сделан вывод, что Ильпирское землетрясение оказывается важным для развития представлений о тектонике региона, являясь серьезным доводом для продолжения на восток области сжатия между Охотской и Северо-Американской плитами и свидетельствуя в пользу гипотезы о прохождении границы между этими плитами через Камчатский перешеек.

Ключевые слова: Ильпирское землетрясение, граница литосферных плит, механизм очага, афтершоковый процесс, тектоническая позиция, макросейсмика, артефакт, Камчатский перешеек.

DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.31

Для цитирования: Кугаенко Ю.А., Дрознина С.Я., Салтыков В.А., Павлов В.М., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Абубакиров И.Р. Ильпирское землетрясение 13 марта 2013 г. с $M_{w\text{per}}=5.8$, $ML=6.2$, $K_S=13.9$, $I_0=8$ (Камчатский перешеек) // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 343–361. doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.31

Ильпирское землетрясение с $K_S=13.9$, $ML=6.2$ [1, 2], $M_{w\text{per}}=5.8$ [3–6], произошло 13 марта 2013 г. в 03^h12^m в Карагинском районе Камчатского края (табл. 1, рис. 1) [7]. Его название связано с ближайшим к эпицентру населенным пунктом – с Ильпирское ($\Delta \sim 42$ км). Землетрясение ощущалось на территории Карагинского, Олюторского, Пенжинского и Тигильского районов Камчатского края с интенсивностью до $I=6-7$ баллов по шкале MSK-64 [8]. В 2013 г. это максимальная интенсивность сотрясений для региона ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН (сеть KRSC).

Таблица 1. Основные параметры Ильпирского землетрясения и двух его сильнейших афтершоков по данным различных сейсмологических агентств

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр			Магнитуда / число станций	Источник		
			φ° N	λ° E	δ , км			h , км	δh , км
Основное событие 13 марта 2013 г.									
KRSC	03 12 52.9	1.8	60.08	163.47	19	24	30	$M_{w\text{per}}=5.8/13$, $M_c=6.3/3$, $K_S=13.9/4$, $ML=6.2/4$	[1, 2]

Агент-ство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр					Магнитуда / число станций	Источ-ник
			φ° N	λ° E	δ , км	h , км	δh , км		
MOS	03 12 52.90	1	60.257	163.400		21		$m_b=5.9/129$, $MS=5.7/138$, $MPSP=5.9/129$	[9]
ISC	03 12 52.7	0.4	60.106	163.510		10	2	$m_b=5.7/733$, $Ms=5.7/711$	[4]
NEIC	03 12 52.2	2.0	60.233	163.400		5	2	$m_b=5.7/604$, $Ms=5.6/690$, $Mw=5.8$	[5]
GCMT*	03 12 55.2	0.1	60.230	163.610		12		$Mw=5.8/123$	[6]
Афтершок 20 апреля 2013 г.									
KRSC	11 33 45.8	0.9	60.05	163.53	14	52	18	$Mw_{\text{pet}}=4.1/3$, $K_S=11.8/2$, $ML=5.2/2$	[1, 2]
MOS	11 33 48.6	1.6	59.941	163.615		46		$m_b=4.3/7$	[9]
ISC	11 33 45.8	1.5	60.021	163.640		3	11	$m_b=4.0/36$	[5]
NEIC	11 33 47.5	1.7	59.930	163.587		14	5	$m_b=4.0/28$	[6]
Афтершок 06 мая 2013 г.									
KRSC	18 23 33.9	1.5	60.13	163.41	16	20	25	$Mw_{\text{pet}}=4.6/8$, $Mc=5.1/3$, $K_S=12.9/5$, $ML=5.7/5$	[1, 2]
MOS	18 23 33.5	1.2	60.097	163.496		16		$m_b=5.0/70$, $MS=4.2/20$,	[9]
ISC	18 23 36.6	0.4	60.106	163.510		10	2	$m_b=4.8/240$, $Ms=4.1/40$	[4]
NEIC	18 23 36.0	2.0	60.233	163.400		5	2	$m_b=4.9/158$	[5]
GCMT*	18 23 36.0	0.3	60.190	163.540		12		$Mw=4.8/76$	[6]

Примечание. * – параметры центроида.

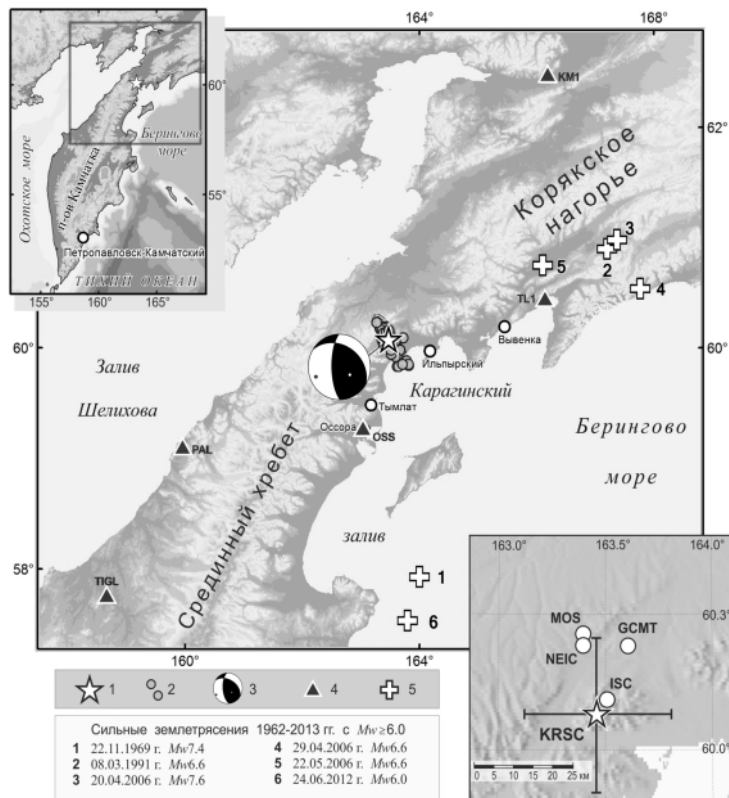


Рис. 1. Расположение эпицентров Ильпирского землетрясения и его афтершоков по данным KRSC [1, 2]

1 – эпицентр Ильпирского землетрясения; 2 – эпицентры афтершоков; 3 – стереограмма механизма очага Ильпирского землетрясения в равноплоскостной проекции нижней полусферы; 4 – сейсмическая станция; 5 – эпицентры сильных землетрясений с $M_w \geq 6.0$ ($K_S \geq 13.5$) 1962–2013 гг. Нижняя врезка – эпицентр Ильпирского землетрясения по данным различных агентств. Интервалы соответствуют погрешности определения эпицентра по программе DIMAS [10] в [1] (~19 км, табл. 1).

Сейсмичность северной части п-ва Камчатка и Корякского нагорья детально рассмотрена в работах [11, 12]. Сейсмические события с магнитудой $M \geq 6$ происходят в этом районе достаточно редко. За время детальных сейсмологических наблюдений для области с линейными размерами $\sim 200 \times 200$ км², окружающей эпицентр Ильпирского землетрясения, это событие стало

сильнейшим. Ближайшие сильные землетрясения Корякского сейсмического пояса удалены от него на расстояние $\sim 250\text{--}300$ км (рис. 1), наиболее значительные из них – Озерновское землетрясение 22.11.1969 г. с $M_w=7.4$ [13, 14] и Олюторское землетрясение 20.04.2006 г. с $M_w=7.6$ [6, 12, 15]. Таким образом, Ильпырское землетрясение является редким для севера Камчатки ощутимым землетрясением с $M\sim 6$. Кроме того, расположение Ильпырского землетрясения и его афтершокового облака в районе предполагаемой границы Северо-Американской и Охотской литосферных плит [16–18] вносит новые аргументы в тектоническую дискуссию о существовании этой границы (рис. 2).

Инструментальные данные. Первые оценки параметров землетрясения по регламентам Службы срочных донесений (ССД) и Службы предупреждения о цунами (СПЦ) были получены в Камчатском региональном информационно-обрабатывающем центре в течение 4 мин [7]. Через 7 мин по минимальному набору станций гипоцентр был определен в районе Камчатского перешейка на глубине $h \sim 0$ км, магнитуда землетрясения была оценена как $M_S=5.8$. Тревога цунами не объявлялась.

Окончательная обработка Ильпырского землетрясения проведена по данным 44 станций постоянной сети Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН (KRSC) ($\Delta=94\text{--}1050$ км), четырех станций Сахалинского филиала (SKHL) ($\Delta=1150\text{--}1990$ км) и одной – Якутского филиала (YARS) ($\Delta=1990$ км). Несмотря на то, что региональные сейсмические станции в районе Камчатского перешейка немногочисленны (рис. 1), а ближайшая к эпицентру – «Оссора» (OSS) – удалена от него на расстояние 94 км, использовавшиеся станции обеспечивают удовлетворительную локацию зарегистрированных землетрясений и представительность каталога афтершоков.

По данным ISC [4] Ильпырское землетрясение было зарегистрировано 2297 сейсмическими станциями Земли, а его наиболее сильные афтершоки (20 апреля с $M_{w, \text{рег}}=4.1$ и 6 мая с $M_{w, \text{рег}}=4.8$) – 95 и 547 станциями соответственно. Региональный гипоцентр главного события приведен в табл. 1 и на врезке к рис. 1 в сопоставлении с решениями международных агентств MOS, ISC, NEIC, GCMТ. Параметры эпицентра Ильпырского землетрясения, рассчитанные различными сейсмологическими службами, близки и попадают в область погрешности регионального решения, полученного в [1] (табл. 1, врезка на рис. 1). Следует отметить различия в расчетной глубине землетрясения (табл. 1).

Механизм очага. Региональный механизм очага Ильпырского землетрясения был определен двумя независимыми методами: через инверсию широкополосных волновых форм региональных станций в тензор сейсмического момента (ТСМ) и по знакам первых вступлений продольных волн. Решение, полученное по волновым формам (Wave Forms, далее WF), относится к очагу в целом и рассматривается как наиболее информативное. При расчетах использовались записи камчатских сейсмических станций с привлечением данных мировой сети.

При инверсии широкополосных волновых форм применен алгоритм KRSMT (Kamchatka Regional Seismic Moment Tensor), разработанный в КФ ФИЦ ЕГС РАН и описанный в работе [19]. Этот алгоритм позволяет оценивать как ТСМ, так и глубину h эквивалентного точечного источника. При этом координаты эпицентра считаются известными (в данной работе они заданы по региональному каталогу Камчатки и Командорских островов [1]). Алгоритм KRSMT позволяет провести расчеты ТСМ двух типов:

- ТСМ «с нулевым следом» (Null Trace, далее NT);
- ТСМ типа «двойной диполь без момента» (Double-Couple, далее DC).

В первом случае механизм оценивается по полученному ТСМ (так называемый ближайший двойной диполь), во втором – непосредственно по волновым формам. Предпочтительным считается DC механизм как определяемый более устойчиво, так как число неизвестных (их четыре) на единицу меньше по сравнению с вариантом NT.

Для расчета ТСМ помимо камчатских данных привлекались широкополосные записи сейсмических сетей Сахалина, IRIS [20], ARN [21].



Рис. 2. Эпицентр Ильпырского землетрясения (звезда) на схеме, иллюстрирующей мозаику литосферных плит в районе северо-западной окраины Тихого океана [16–18]

Результаты расчета механизма представлены на рис. 3. По региональным данным оптимальный механизм Ильпирского землетрясения соответствует глубине $h=5$ км. Моментная магнитуда M_w вычислялась согласно международному стандарту [22] по формуле $M_{w_{per}}=(2/3) \cdot (\lg M_0 [H \cdot м] - 9.1)$. Значение моментной магнитуды из каталогов GCMT и NEIC совпадает с оценкой $M_{w_{per}}=5.8$ по KRSMT.

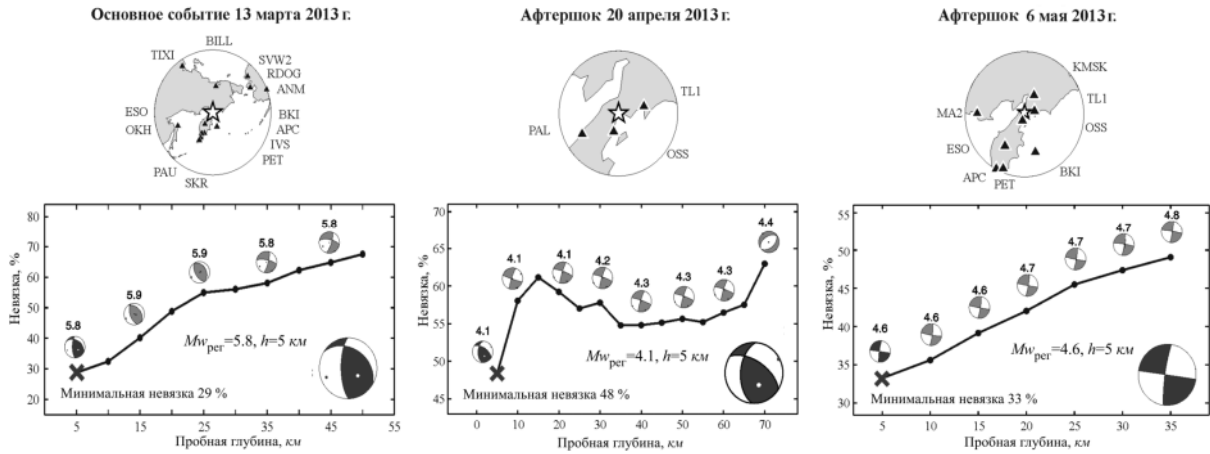


Рис. 3. Результаты расчета ТСМ типа «двойной диполь без момента» для Ильпирского землетрясения 13 марта 2013 г. (а) и двух его афтершоков (б, в)

Показана зависимость остаточной невязки от пробной глубины (с шагом 5 км). Для каждой глубины приведены соответствующий механизм и значение моментной магнитуды. На картах слева показаны использованные в расчетах станции (треугольники) и эпицентры (звезда). Стереогаммы механизмов очагов представлены в равноплощадной проекции нижней полусферы.

Для сравнения механизмов очага землетрясения используется угол Кагана k [23]. Под углом k понимается наименьший угол поворота осей одного механизма вокруг некоторой оси до совмещения с соответствующими осями другого. Наибольшее возможное значение такого угла равно 120° [23]. Расчеты, проведенные по методу KRSMT для вариантов NT и DC, дали близкие результаты, которые, в свою очередь, согласуются с решениями агентств GCMT и NEIC (табл. 2, рис. 4). Например, при сравнении механизма KRSMT, DC и GCMT $k=11^\circ$ (при сравнении № 3 и № 5 в табл. 2).

Таблица 2. Параметры механизма очага Ильпирского землетрясения 13 марта 2013 г. с $M_{w_{per}}=5.8$ и его афтершоков 20 апреля с $M_{w_{per}}=4.1$ и 6 мая с $M_{w_{per}}=4.8$

№	Агентство	Метод	h, км	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						M ₀ , H·м	M _{w_{per}}	Источник
				T		N		P		NP1			NP2					
				PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP			
Основное событие 13.03.2013 г.																		
1	KRSC	FM		84	148	6	328	0	58	154	45	99	322	45	81			[24]
2		FM		53	162	37	342	0	72	193	56	137	311	56	43			[25]
3		KRSMT, WF, DC	5	56	125	26	349	20	248	179	70	118	302	34	38	$7.49 \cdot 10^{17}$	5.8	[3]
4		KRSMT, WF, NT	5	58	120	24	346	21	247	176	70	115	302	32	41	$7.44 \cdot 10^{17}$	5.8	наст. ст.
5	GCMT	WF, NT	12	58	135	30	339	11	243	176	62	124	301	43	44	$6.33 \cdot 10^{17}$	5.8	[6]
6	NEIC	WF, NT	15	59	119	23	343	19	245	173	68	115	302	33	43	$6.40 \cdot 10^{17}$	5.8	[5]
Афтершок 20.04.2013 г.																		
7	KRSC	KRSMT, WF, DC	5	54	158	35	329	4	62	184	51	138	303	58	47	$1.58 \cdot 10^{15}$	4.1	[3]
8		KRSMT, WF, NT	5	54	157	36	330	3	62	184	52	138	303	58	46	$1.61 \cdot 10^{15}$	4.1	наст. ст.
Афтершок 06.05.2013 г.																		
9	KRSC	FM		18	324	72	153	3	55	8	79	165	101	75	11			[25]
10		KRSMT, WF, DC	5	6	143	81	278	6	53	188	81	180	98	90	-9	$9.62 \cdot 10^{15}$	4.6	[3]
11		KRSMT, WF, NT	5	8	143	81	289	5	52	188	81	178	278	88	9	$9.80 \cdot 10^{15}$	4.6	наст. ст.
12	GCMT	WF, NT	12	17	327	63	93	21	231	10	63	-177	278	87	-27	$1.77 \cdot 10^{16}$	4.8	[6]

Примечание: h – глубина эквивалентного точечного источника

Для расчета механизма очага Ильпырского землетрясения по знакам первых вступлений P -волн (First Motion, далее FM) была применена программа А.В. Ландера FA2011 [26]. Расчеты по FM методике проведены дважды. В [7, 24] опубликовано решение, в определении которого участвовали преимущественно камчатские станции ($N=41$). В уточненном варианте расчетов [25] набор использовавшихся станций был существенно расширен ($N=156$) за счет привлечения данных ISC. Тип подвижки в очаге по FM согласуется с решениями, полученными KRSMT, DC и KRSMT, NT по полным волновым формам.

Расчеты по независимым методикам свидетельствуют, что механизм очага Ильпырского землетрясения – взбросо-сдвиг с субгоризонтальной осью сжатия в направлении с северо-востока на юго-запад.

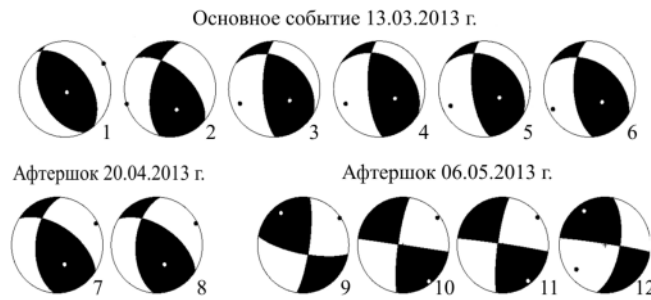


Рис. 4. Стереогаммы фокальных механизмов Ильпырского землетрясения 13 марта 2013 г. с $M_{w_{\text{пер}}}=5.8$ и его афтершоков 20 апреля с $M_{w_{\text{пер}}}=4.1$ и 6 мая с $M_{w_{\text{пер}}}=4.8$ по данным разных источников

Номера соответствуют решениям в табл. 2. Стереогаммы приведены в равноплощадной проекции.

Также был определен механизм очага и получены оценки глубины и моментной магнитуды $M_{w_{\text{пер}}}$ для двух сильных афтершоков: 20 апреля с $M_{\text{пер}}=4.1$ и 6 мая с $M_{w_{\text{пер}}}=4.8$ (табл. 2, рис. 3, 4).

Механизм события 20 апреля с $M_{w_{\text{пер}}}=4.1$ незначительно отличается от решения для основного события: угол Кагана $k=26^\circ$ (при сравнении № 3 и № 7 из табл. 2). Отметим, что механизм этого землетрясения отсутствует в других центрах данных, в частности, GCMT и NEIC.

Механизм очага сильнейшего афтершока 6 мая с $M_{w_{\text{пер}}}=4.8$, так же, как и для Ильпырского землетрясения, определен различными методами, давшими близкие решения. Однако, как видим, механизм этого афтершока существенно отличается от механизма главного толчка: nodальные плоскости субвертикальны; тип подвижки – сдвиг. Различие механизмов проявляется и в увеличении угла Кагана: $k=76^\circ$ (при сравнении № 5 и № 12 из табл. 2). Таким образом, выявлено изменение движений в очагах в ходе афтершокового процесса. В то же время угол между осями сжатия этих механизмов составляет 15° , что говорит об устойчивости северо-восток – юго-западного направления сжатия очаговой зоны.

Зная M_w , мы можем оценить размеры площадки разрыва Ильпырского землетрясения. Площадь разрыва S оценивается из корреляционных зависимостей вида:

$$\lg S, \text{ км}^2 = M_{w_{\text{пер}}} - 4.1 \quad [27], \quad (1)$$

$$\lg S, \text{ км}^2 = (M_{w_{\text{пер}}} - 4.07) / 0.98 \quad [28]. \quad (2)$$

Для Ильпырского землетрясения с $M_{w_{\text{пер}}}=5.8$ получаем $S=50\text{--}55 \text{ км}^2$. Если площадка разрыва является эллипсом, длинная (a_1) и короткая (a_2) главные оси которого соотносятся как $a_1/a_2 \sim 2$, то длина и ширина площадки оценивается как $a_1=12 \text{ км}$, $a_2=6 \text{ км}$.

Для сильнейшего афтершока 6 мая с $M_{w_{\text{пер}}}=4.8$ $S=5\text{--}5.5 \text{ км}^2$, $a_1=4 \text{ км}$, $a_2=2 \text{ км}$.

Для афтершока 20 апреля с $M_{w_{\text{пер}}}=4.1$ $S=1 \text{ км}^2$, $a_1=1.6 \text{ км}$, $a_2=0.8 \text{ км}$.

Особенности афтершокового процесса. Анализ сейсмичности в окрестностях очаговой зоны Ильпырского землетрясения показал, что за годы детальных сейсмологических наблюдений (с 1961 г.) здесь было зарегистрировано лишь несколько землетрясений, сильнейшим из них является Ильпырское. Не имея достаточной статистики, фоновый поток предвещающей сейсмичности можно грубо оценить как семь землетрясений с $ML>3.8$ во временном окне длительностью пять лет (2007–2012 гг.).

Форшоковая активность перед Ильпырским землетрясением не выявлена.

Афтершоковая последовательность выделена из каталога оконным методом: рассматриваются все землетрясения, имеющие координаты в диапазоне $\varphi=59.63^\circ\text{--}60.35^\circ\text{N}$ и $\lambda=163^\circ\text{--}164.2^\circ\text{E}$. Анализ афтершоков проведен с использованием региональной оценки локальной магнитуды $ML=(K_S-1.5)/2$, где $K_S=\lg(E, \text{ Дж})$ – энергетический класс по [29], E – выделившаяся сейсмическая энергия. Проблемы обработки Ильпырских афтершоков рассмотрены в отдельном разделе в конце статьи.

За пять лет, последовавших за Ильпырским землетрясением, в этой области зарегистрировано около 300 сейсмических событий с магнитудой в диапазоне $ML=2.5-5.7$ ($K_S=6.4-12.9$), из них 245 произошло в течение первого года после основного события [2].

Известно, что в течение некоторого, априори не определенного времени после сильного землетрясения представительность каталога афтершоков по техническим причинам ухудшается, поэтому оценка представительности ML_{\min} по общему графику повторяемости Гутенберга-Рихтера может оказаться некорректной. Вариации представительности были рассчитаны с использованием подходов, изложенных в [30, 31]. На рис. 5 представлен временной ход ML_{\min} после Ильпырского землетрясения.

В интервале времени, ограниченном вертикальными пунктирами (между ~ 40 мин и 1000 сут после Ильпырского землетрясения), представительность каталога колеблется в пределах $ML_{\min}=2.7-3.0$ и в целом может быть принята по верхней границе «мгновенных» значений, что соответствует $ML_{\min}=3.0$. В течение первых 40 мин (0.027 сут) после главного толчка представительность каталога была существенно хуже.

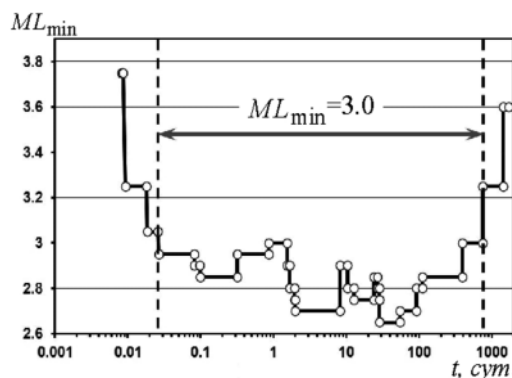


Рис. 5. Временной ход представительной магнитуды ML_{\min} афтершоков Ильпырского землетрясения

За начало отсчета взято время t_0 Ильпырского землетрясения в табл. 1. Значения ML_{\min} получены в скользящем окне, содержащем 25 событий представительной магнитуды. Статистическая значимость оценки составляет $\alpha=0.3$.

Учитывая оценку представительности, для анализа потока афтершоков использован каталог землетрясений с $ML \geq ML_{\min}=3.0$, содержащий около 200 землетрясений из очаговой области Ильпырского землетрясения.

На рис. 6 показан временной ход параметров сейсмичности (сейсмической энергии и количества землетрясений) для первых трех месяцев после главного толчка.

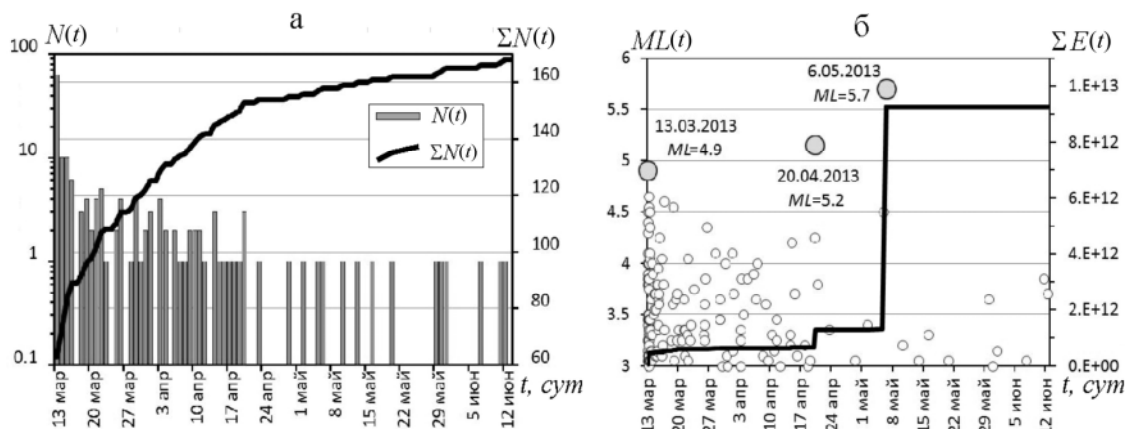


Рис. 6. Временной ход афтершоковой сейсмичности с $ML \geq 3.0$

а: – число афтершоков в сутки $N(t)$ и кумулятивный график числа афтершоков $\Sigma N(t)$; б: – кумулятивный график сейсмической энергии $\Sigma E(t)$ (сплошная линия), выделенной при афтершоках показанных магнитуд (кружки). Серым фоном отмечены главный толчок и наиболее сильные афтершоки.

Для первого месяца афтершокового процесса наиболее сильным является афтершок 13 марта в 07^h08^m с $ML=4.9$ ($K_S=11.3$), зарегистрированный через четыре часа после Ильпырского землетрясения (рис. 6). Его отличие по магнитуде от основного события $\Delta M=1.3$ ($\Delta K_S=2.6$) соответствует закону Бота [32] и является достаточно типичным случаем. Сильнейшие афтершоки произошли позднее: 20 апреля в 11^h33^m с $ML=5.2$, $M_{w\text{per}}=4.1$ и 6 мая в 18^h23^m с $ML=5.7$, $M_{w\text{per}}=4.8$. Афтершок 6 мая, являясь сильнейшим во всей последовательности, произошел на финальной стадии афтершокового процесса и может рассматриваться как маркер его завершения, как будет показано ниже.

Для выявления особенностей временного хода афтершокового процесса представим его в виде кумулятивного графика числа землетрясений в логарифмическом масштабе времени (t – время относительно момента Ильпырского землетрясения) и линейном масштабе числа афтершоков (рис. 7). В целом график не противоречит обычно наблюдаемой картине – это последовательность землетрясений с убывающей во времени интенсивностью. Детальный анализ временного хода выявил два временных интервала (две фазы) афтершокового процесса, характеризующихся различными типами этого убывания: 1 – по гиперболическому закону (с $t=0.037$ сут по $t=8.2$ сут) и 2 – по экспоненциальному закону (с $t=2.5$ сут по $t=90$ сут). Полученное перекрытие на участке $t=2.5-8.2$ сут интерпретируется как переходный процесс смены типа афтершокового режима. В случае афтершоков Ильпырского землетрясения смена режимов с гиперболического на экспоненциальный произошла плавно в течение 6 сут. Среднеквадратичная разница двух аппроксимаций на этом участке составила 0.7, что существенно меньше среднеквадратичных ошибок аппроксимаций для двух фаз, равных 2–3.

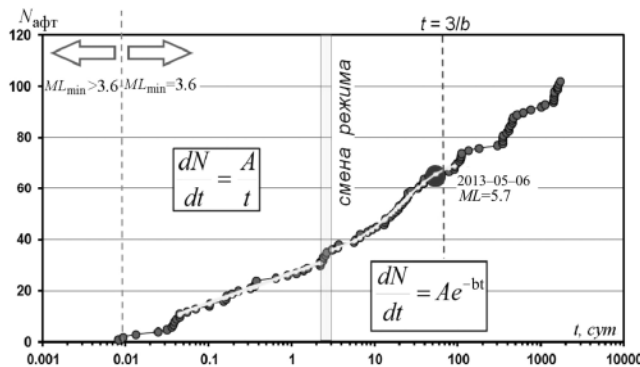


Рис. 7. Развитие афтершокового процесса Ильпырского землетрясения 13 марта 2013 г. с $ML=6.2$ во времени

За начало отсчета взято время основного события $t_0=3^h12^m52^s$. Приведена кумулятивная кривая числа афтершоков с $ML \geq 3.0$ (кружки). Показана аппроксимация кривой, соответствующей указанному типу затухания скорости сейсмического потока (сплошная линия). Отмечен наиболее сильный афтершок. Пунктиром отмечено начало части каталога афтершоков с представительностью $ML_{min}=3.0$.

Первая фаза имеет длительность 8.2 сут. Это афтершоковый процесс, затухающий по гиперболическому закону $dN/dt = A/t$, где $A=15.4$. К первой фазе относится 84 афтершока. Ее начало выявляется лишь через один час после главного толчка, что связано с ухудшением представительности каталога: невозможностью корректного выделения вступлений P - и S -волн на фоне предыдущих событий. Так, в течение первого часа в сейсмических записях было обнаружено около 40 событий, однако лишь для 20 из них удалось рассчитать гипоцентр.

В целях сопоставления характеристик афтершоковых последовательностей различных сильных землетрясений необходимо привести значение интенсивности A к некоторому уровню магнитуд, не связанному с представительностью конкретной последовательности, но единому для всего каталога. Для определенности предлагается использовать $A_{M3.5}$, соответствующую магнитуде $ML=3.5$. Пересчет значения A делается на основе закона Гутенберга-Рихтера с учетом величины наклона графика повторяемости b : $A_{M3.5} = A \cdot 10^{-b(3.5-M)}$, что дает $A_{M3.5}=4.9$ при $b=1$.

Вторая фаза соответствует экспоненциальному закону убывания афтершоков $dN/dt = A \exp(-t/\tau)$ и имеет длительность 88 сут. За это время произошло 86 землетрясений, т.е. по количеству афтершоков две выделенные фазы афтершокового процесса близки. Для экспоненциального участка $A=3.9$, что соответствует приведенному значению $A_{M3.5}=1.24$. Параметр τ по своему физическому смыслу является временем релаксации, что позволяет ввести формальную оценку продолжительности афтершокового процесса как $\Delta T_{афт}=3\tau$, которая в нашем случае при $\tau=25$ сут равна 75 сут. Обращает на себя внимание факт возникновения на завершающей стадии афтершокового процесса сильнейшего афтершока 6 мая с $ML=5.7$.

После завершения экспоненциальной фазы (с середины июня 2013 г.) интенсивность потока землетрясений существенно снизилась, но формально не вышла в течение года на фоновый уровень, оцененный по сейсмичности 2007–2012 гг. и составивший ~ 8 землетрясений в год с $ML \geq 3.0$. Со второй половины июня 2013 г. и до мая 2014 г. произошло 32 землетрясения такой магнитуды, однако 2/3 этих землетрясений образуют кластеры и могут не учитываться при оценке фоновой сейсмичности. При таком допущении поток землетрясений превышает фоновый в 1.5–2 раза, что не представляется существенным различием, учитывая точность получения оценок фона, а значит, не противоречит расчетной оценке продолжительности афтершоковой последовательности $\Delta T_{афт}=75$ сут.

Пространственное расположение афтершоков Ильпырского землетрясения представлено на рис. 8. Невязки определения координат афтершоков составляют для эпицентров $\sim 6 \pm 7$ км, для

глубины $\sim 7 \pm 9$ км (погрешность соответствует среднеквадратичному отклонению) при медианных значениях ~ 3 км (распределение не является нормальным). В отдельных случаях невязки по эпицентру превышают 20 км, а по глубине – 30 км. Облако эпицентров околонуено эллипсом рассеяния, содержащим 90 % событий, что позволяет формально оценить размер очага Ильпирского землетрясения по афтершокам: длина $L_1 \sim 48$ км, ширина $L_2 \sim 12$ км. Азимут большей оси эллипса $Az \sim 142^\circ$. Центр эллипса $\varphi = 60.08^\circ$ N, $\lambda = 163.47^\circ$ E. Отмечаем значительное отличие размеров облака афтершоков L_1, L_2 и оценок размеров площадки разрыва a_1, a_2 . Следует учитывать, что в этом районе редкая сеть сейсмических станций обладает низкой разрешающей способностью в направлении большей оси эллипса рассеяния. Поэтому приведенная формальная оценка размеров очага по афтершокам завышена.

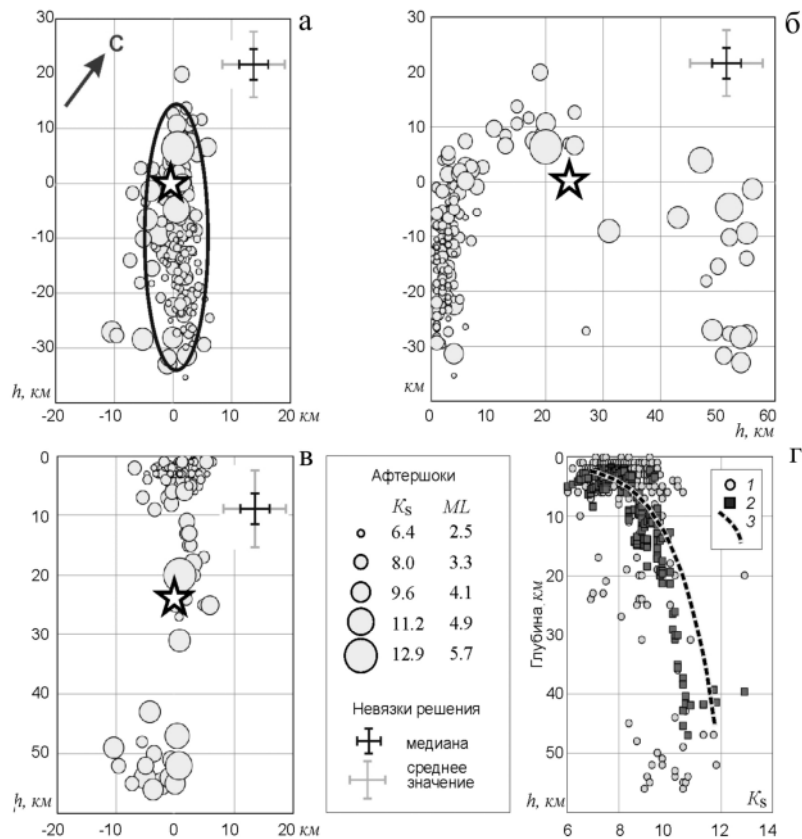


Рис. 8. Афтершоки Ильпирского землетрясения: карта эпицентров (а) и вертикальные разрезы вдоль большой (б) и малой (в) осей эллипса рассеяния афтершоков

Эллипс околонуивает 90 % эпицентров. Звездой отмечено положение Ильпирского землетрясения. Интервалы соответствуют медианным и средним значениям невязок определения координат землетрясений афтершокового облака. Приведена зависимость глубины афтершоков от энергетического класса K_s (г): 1 – точечные значения, 2 – осреднение по пяти последовательным точкам, 3 – аппроксимация экспонентой.

Афтершоки локализованы в диапазоне глубин от 0 до 56 км. Они распределены по глубине неравномерно, для 80 % землетрясений $h < 10$ км. 90 % афтершоков расположено выше гипоцентра главного толчка. Наблюдается зависимость глубины от энергетического класса событий (заглубление более сильных афтершоков, рис. 8 г), что, по-видимому, является артефактом и свидетельствует о несоответствии глубин афтершоков их реальным значениям. Основными причинами являются недостаточное знание скоростного разреза, использование камчатского регионального годографа для территории с иным строением среды, привлечение удаленных на сотни километров станций при обработке наиболее представительных событий.

Учитывая вышесказанное, не следует интерпретировать распределение афтершоков в пространстве и обсуждать их кластеризацию, визуальную выделяемую на разрезах на рис. 8.

Обобщим основные особенности афтершокового процесса Ильпирского землетрясения.

Облако мелкофокусных афтершоков имеет размеры 48×12 км и вытянуто в направлении с северо-запада на юго-восток. Афтершоковый процесс носит двухфазовый характер и может

рассматриваться как убывающий во времени поток сейсмических событий с двумя последовательными стадиями, имеющими разный характер затухания. Смена режимов затухания произошла плавно и не связана с сильными афтершоками. Длительность затухающего афтершокового процесса примерно 75 суток. Завершение афтершокового процесса близко по времени сильнейшему афтершоку 6 мая с $ML=5.7$, $M_{w_{\text{пер}}}=4.8$, при котором проявилась смена типа подвижки в очаге.

Определены численные значения параметров, характеризующих афтершоковый процесс Ильпырского землетрясения, они обобщены в табл. 3. Для сопоставления с афтершоковыми процессами других сильных землетрясений введен параметр $A_{M3.5}$ – интенсивность потока афтершоков, приведенная к единому магнитудному порогу $ML=3.5$.

Таблица 3. Параметры афтершоковой последовательности Ильпырского землетрясения 13 марта 2013 г. с $M_{w_{\text{пер}}}=4.8$

Фаза афтершокового процесса	t , сут	$\Delta T_{\text{афт}}$, сут	A	$A_{M3.5}$	$N_{\text{афт}}$
Неустановившийся режим	0.027	3 τ ~ 75			10
Затухание по гиперболе	8.2		15.4	4.9	84
Затухание по экспоненте	88		3.9	1.24	86

Тектоническая дискуссия. Тектоническая позиция очага Ильпырского землетрясения дискуссионна.

С одной стороны, его очаг располагается вблизи западной границы Корякского сейсмического пояса [12, 16], захватывающего западный шельф Берингова моря и уходящего далее на северо-восток через Корякское нагорье.

С другой стороны, север Камчатки рассматривается как область тройного сочленения плит: Северо-Американской, Охотской (которая является частью Евразийской плиты) и Берингии, причем в ряде работ одна из границ плит проводится поперек Камчатского перешейка [16, 17], где и произошло Ильпырское землетрясение (рис. 2). С северо-запада к этому району подходит Арктико-Азиатский сейсмический пояс, континентальную часть которого представляет сеймотектоническая зона Черского хребта. Но при переходе через залив Шелихова на Камчатский перешеек активность пояса резко спадает и приобретает рассеянный характер. До Ильпырского землетрясения здесь, западнее Корякского пояса, было зарегистрировано всего четыре события с магнитудами около 5.0 [4]. Геологические структуры Камчатского перешейка (включая разломы разного возраста) имеют четко выраженное северо-восточное простирание, поперечных линеаментов здесь не установлено. Таким образом, граница плит, пересекающая Камчатский перешеек в направлении с северо-запада на юго-восток, не выражена ни в слабой локальной сейсмичности, ни в геологии, т.е. гипотеза об этой границе требует привлечения дополнительных фактов.

В настоящей работе анализ механизма Ильпырского землетрясения показывает несоответствие простирания его нодальных плоскостей простиранию Корякского сейсмического пояса, а также большинству механизмов очагов происходивших в нем событий. Для последних характерно сжатие в направлении северо-запад – юго-восток (данные каталога GCMТ), в то время как Ильпырское землетрясение было вызвано сжатием с северо-востока на юго-запад. Такие механизмы здесь не единичны: в ближайших, прилегающих с запада к Корякскому поясу, районах Камчатского перешейка и залива Шелихова зафиксировано еще несколько землетрясений с механизмами, соответствующими северо-восток – юго-западному сжатию, как и при Ильпырском землетрясении. Дальше, к северо-западу, надежно установлена похожая тектоническая картина: сеймотектоническая зона Черского развивается в обстановке транспрессии (сжатия со сдвигом), обусловленной взаимодействием сближающихся Евразийской и Североамериканской литосферных плит [33, 34].

Поэтому сильное Ильпырское землетрясение оказывается важным для развития представлений о тектонике региона, являясь серьезным доводом для продолжения на восток области сжатия между Охотоморской и Северо-Американской плитами и свидетельствуя в пользу гипотезы о прохождении границы между этими плитами через Камчатский перешеек.

Макросейсмические данные. Ильпырское землетрясение ощущалось и имело макро-сейсмический эффект на территории Карагинского, Олюторского, Пенжинского и Тигильского районов Камчатского края [7, 35–37].

Максимальная интенсивность сотрясений, вызванных этим землетрясением, задокументирована в районе р. Анапки ($\Delta=30$ км): на льду реки появились тонкие трещины, и образовалось локальное нагромождение торосов с проломом внутри, что позволяет оценить интенсивность сотрясений в этом пункте наблюдений как $I=6-7$ баллов по шкале MSK-64 [8].

Ильпырское землетрясение ощущалось в 16 населенных пунктах ($\Delta=42-285$ км) с интенсивностью сотрясений I от 2 до 5–6 баллов (табл. 4, рис. 9).

Таблица 4. Макросейсмические сведения об Ильпырском землетрясении 13 марта 2013 г. с $K_S=13.9$, $M_{W_{\text{рег}}}=5.8$

№	Пункт	Δ , км	φ° , N	λ° , E	№	Пункт	Δ , км	φ° , N	λ° , E
	<u>6–7 баллов</u>					<u>3 балла</u>			
1	р. Анапка	30	60.029	163.994	11	Ивашка	181	58.565	162.299
	<u>5–6 баллов</u>				12	Хаилино	209	60.960	166.852
2	Оссора	96	59.244	163.067	13	Палана	227	59.083	159.951
	<u>5 баллов</u>				14	Таловка	280	62.051	166.701
3	Ильпырское	42	59.957	164.179		<u>2–3 балла</u>			
4	Карага	110	59.108	163.123	15	Ледяное	172	60.973	166.047
5	Кострома	117	59.040	163.166	16	Манилы	285	62.485	165.340
	<u>4–5 баллов</u>					<u>Ощущалось</u>			
6	Тымлат	68	59.489	163.188	17	ГМС Чемурнаут	77	60.753	163.125
7	Корф	144	60.372	166.015		<u>Не ощущалось</u>			
8	Тилички	148	60.430	166.055	18	Парень	261	62.418	163.089
	<u>4 балла</u>				19	ГМС мыс Озерной	263	57.719	163.302
9	Вывенка	111	60.186	165.460	20	Каменское	303	62.468	166.204
	<u>3–4 балла</u>				21	Воямполка	305	58.307	159.393
10	Лесная	177	59.467	160.556	22	Пахачи	317	60.556	169.141
					23	Средние Пахачи	318	60.829	169.069

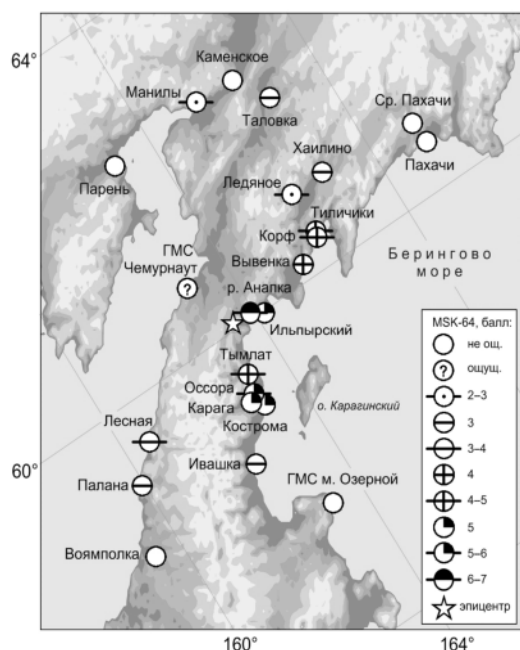


Рис. 9. Карта пунктов-баллов Ильпырского землетрясения 13 марта 2013 г.

В п. Оссора ($\Delta=96$ км, $I=5-6$ баллов) сотрясения ощущали все жители поселка. Многие перед началом колебаний слышали гул, напоминающий звук от движения тяжелого транспорта. Затем люди ощутили сильный толчок, на верхних этажах зданий – плавное сильное покачивание. Во всех домах сильно раскачивались всякие предметы, дребезжала и подпрыгивала посуда, в старых рамах звенели стекла окон. Скрипела, дрожала, раскачивалась мебель и плоские телевизоры. В некоторых квартирах открывались двери. Отмечалось падение небольших, неустойчивых предметов. На четвертом этаже школы наблюдались колебания дверных косяков, один из дверных наличников оказался выдавлен; на третьем и четвертом этажах с потолка осыпалась шпаклевка, был слышен треск от движения стен и перекрытий. С улицы в штукатурке трехэтажного старого каменного здания начальной школы появилась длинная трещина, там же под карнизами в углах окон и со стены упали пласты штукатурки, оголив кладку. Некоторые жители в момент землетрясения находились на льду залива на подледной рыбалке и почувствовали сильный однократный толчок, по прибрежному ледяному припаю пошли тонкие трещины. В результате землетрясения большинство опрошенных людей испытали испуг, в панике покинули помещение, долгое время находились на улице. У некоторых жителей ухудшилось самочувствие (головные боли, сердечные боли).

Вслед за главным толчком было зарегистрировано 18 ощутимых афтершоков с $K_S=8.5-12.9$ и интенсивностью сотрясений I от 2 до 4 баллов, из них восемь землетрясений – в первые сутки после основного события ($K_S=9.5-11.3$).

Сведения об интенсивности и полное описание макросейсмических проявлений Ильпырского землетрясения в населенных пунктах Камчатского края приведено в [35, 36].

На сейсмической станции «Тиличики» (TL1) на эпицентральной расстоянии ~ 150 км была получена запись с заметной (более 0.5 см/с²) пиковой амплитудой ускорения Ильпырского землетрясения [7, 37]. В 2013 г. станция «Тиличики» была оборудована цифровым велосиметром SMG-3ТВ (частотный диапазон 0.0083–40 Гц, канал ВН (E, N, Z)) и цифровым акселерометром SMG-5Т (частотный диапазон 0–40 Гц, канал НН (E, N, Z)).

Пиковые ускорения для компонент E, N, Z составили:

- на канале НН: -16.71 см/с², -15.74 см/с² и 7.19 см/с²;
- на канале ВН: -17.79 см/с², -14.21 см/с² и -7.65 см/с².

Пиковые скорости для компонент E, N, Z составили:

- на канале НН: 2.903 см/с, 2.004 см/с и 0.961 см/с;
- на канале ВН: 3.021 см/с, -1.61 см/с и -0.973 см/с.

Оценка интенсивности сотрясений в очаговой зоне. Для оценки интенсивности сотрясений I_0 в эпицентральной зоне Ильпырского землетрясения использовано линейное уравнение макросейсмического поля для Камчатки из [38]:

$$I_0=1.5 M-2.6 \lg h+2.5. \quad (3)$$

В соответствии с этой формулой, для землетрясения с магнитудой $M\sim 6$ и глубиной гипоцентра $h=24$ км расчетная интенсивность $I_0^P=8$ баллов.

Близкое значение интенсивности $I_0^P=7.5$ баллов может быть получено и при применении использовавшегося ранее для поверхностных землетрясений Камчатки уравнения макросейсмического поля из [39]:

$$I_0=1.5 M-2.63 \lg h-0.0087 h+2.5. \quad (4)$$

Поэтому в название статьи внесено расчетное значение $I_0^P=8$ баллов.

Однако учитывая, что ошибка определения глубины Ильпырского землетрясения равна ~ 30 км, а большинство афтершоков сосредоточено в приповерхностных слоях земной коры, реальная глубина гипоцентра может быть меньшей. Решения гипоцентров в каталогах зарубежных агентств лежат в диапазоне $h=5-15$ км (табл. 1). Поэтому оценим интенсивность колебаний в эпицентральной зоне при гипотетической глубине гипоцентра $h=10$ км. В этом случае в ограниченной области над очагом землетрясения $I_0^P=9$ баллов.

Расчетные оценки интенсивности сотрясений I_0 в эпицентральной зоне Ильпырского землетрясения не противоречат карте общего сейсмического районирования (ОСР-2016 А, В, С) России для севера Камчатского края [40].

Проблемы обработки афтершоков Ильпырского землетрясения. Обработка афтершоков Ильпырского землетрясения выявила проблемы, которые могут возникнуть при работе с сейсмическими событиями, когда ближайшие сейсмические станции немногочисленны и их расположение неоптимально. В данном случае ближайшие к афтершоковому облаку региональные станции линейно вытянуты вдоль Камчатского перешейка (рис. 1), это предполагает ограниченный азимутальный охват очага и худшую точность гипоцентрии в поперечном направлении.

По результатам первичной оперативной обработки, афтершоковое облако Ильпырского землетрясения обладало ярко выраженной линейностью и большой протяженностью: ~ 150 км, что на порядок превышает размеры типичной афтершоковой области для землетрясения с магнитудой $M=6$ (рис. 10 а). Указанные особенности облака афтершоков важны в аспекте региональной тектоники и геодинамики. Ильпырское землетрясение и гигантская область его афтершоков могли бы интерпретироваться как активизация крупной разломной структуры в зоне тройного сочленения литосферных плит (рис. 2), что, в свою очередь, должно было повысить сейсмическую и цунами опасность для населенных пунктов на севере Камчатского края [41, 42].

Однако анализ сейсмологического материала показал, что выявленная при оперативной обработке линейная структура эпицентров в Карагинском заливе является артефактом [43, 44]. В данном случае был успешно применен поляризационный анализ, обосновавший необходимость дополнительного исследования. Основная причина возникновения артефакта – минимальное

количество станций, участвующих в определении гипоцентров большинства афтершоков и их квазилинейное расположение (рис. 10), что приводит к неоднозначности решения при расчете параметров (рис. 11, 12).

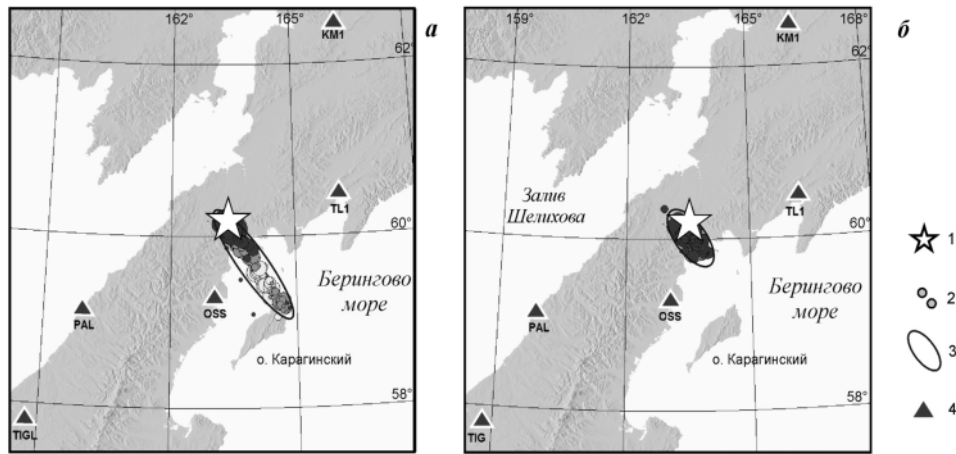


Рис. 10. Афтершоки Ильпырского землетрясения по результатам первичной оперативной обработки (а) и после перерасчета гипоцентрии (б)

1 – эпицентр Ильпырского землетрясения; 2 – эпицентры афтершоков; 3 – эллипс рассеяния, содержащий 90 % афтершоков; 5 – сейсмическая станция.

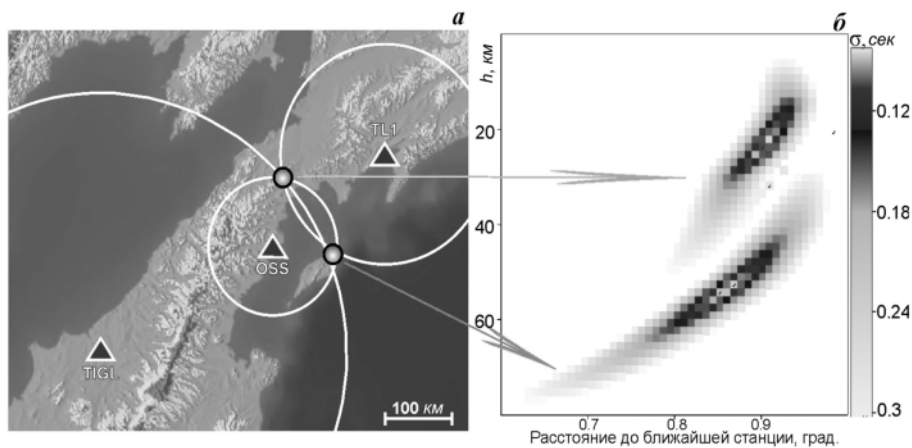


Рис. 11. Пример неоднозначности решения при расчете гипоцентра афтершока Ильпырского землетрясения по записям трех станций, обработка в программе DIMAS [10]

а – два равнозначно возможных положения эпицентра (малые кружки); б – облака невязок, соответствующие двум полученным решениям. Треугольники – сейсмические станции. Среднеквадратическое отклонение от теоретических времен пробега в секундах обозначено σ .

Рассмотрим доверительные области решений для разного уровня допустимых ошибок времен прихода при локализации землетрясения только единичными близкими станциями (рис. 12). Для примера взяты три афтершока, локализованных при первичной обработке в разных частях афтершокового облака Ильпырского землетрясения. Для расчета доверительных областей использована программа НММ (автор А.В. Ландер). На каждой паре «карта-разрез» нанесена доверительная область одного афтершока, но на нее для сравнения наложен каталог афтершоков за первый месяц после основного события (результаты первичной оперативной обработки). Форма доверительной области определяется расположением использованных станций. Большинство событий определено по трем-четырем ближайшим к эпицентральной области станциям (рис. 1). Они расположены квазилинейно вдоль простирания Камчатского перешейка. Как видим из примеров на рис. 12, весь набор афтершоков попадает в доверительную область любого из единичных землетрясений. В пределах доверительной области решения практически равноценны, поэтому даже небольшие ошибки в исходных данных ведут к значительному смещению решения вдоль этой области. Это и приводит к артефакту – появлению кажущейся полосы эпицентров.

Все доверительные области устроены примерно одинаково и представляют собой полукольцо в вертикальной плоскости. Плоскость доверительной области перпендикулярна линии, соединяющей две ближайшие сейсмические станции: «Оссора» (OSS) и «Тиличики» (TL1). Центр кольца невязок близок к этой линии. Таким образом, в условиях ограниченного числа сейсмических станций на Камчатском перешейке всегда может получаться аналогичная кажущаяся линия эпицентров, если события концентрируются в одном месте. Подобные артефакты вероятны и в других сейсмоактивных районах с малым количеством сейсмических станций, не обеспечивающих полный азимутальный охват эпицентральной зоны.

В результате переопределения гипоцентров 65 % Ильпырских афтершоков длина афтершокового кластера уменьшилась в 3 раза, до 48 км (рис. 10 б). Тем не менее, этот параметр остается завышенным для землетрясения с $M_{w_{пер}}=5.8$. Ориентация зоны афтершоков осталась прежней: облако простирается в направлении северо-запад–юго-восток.

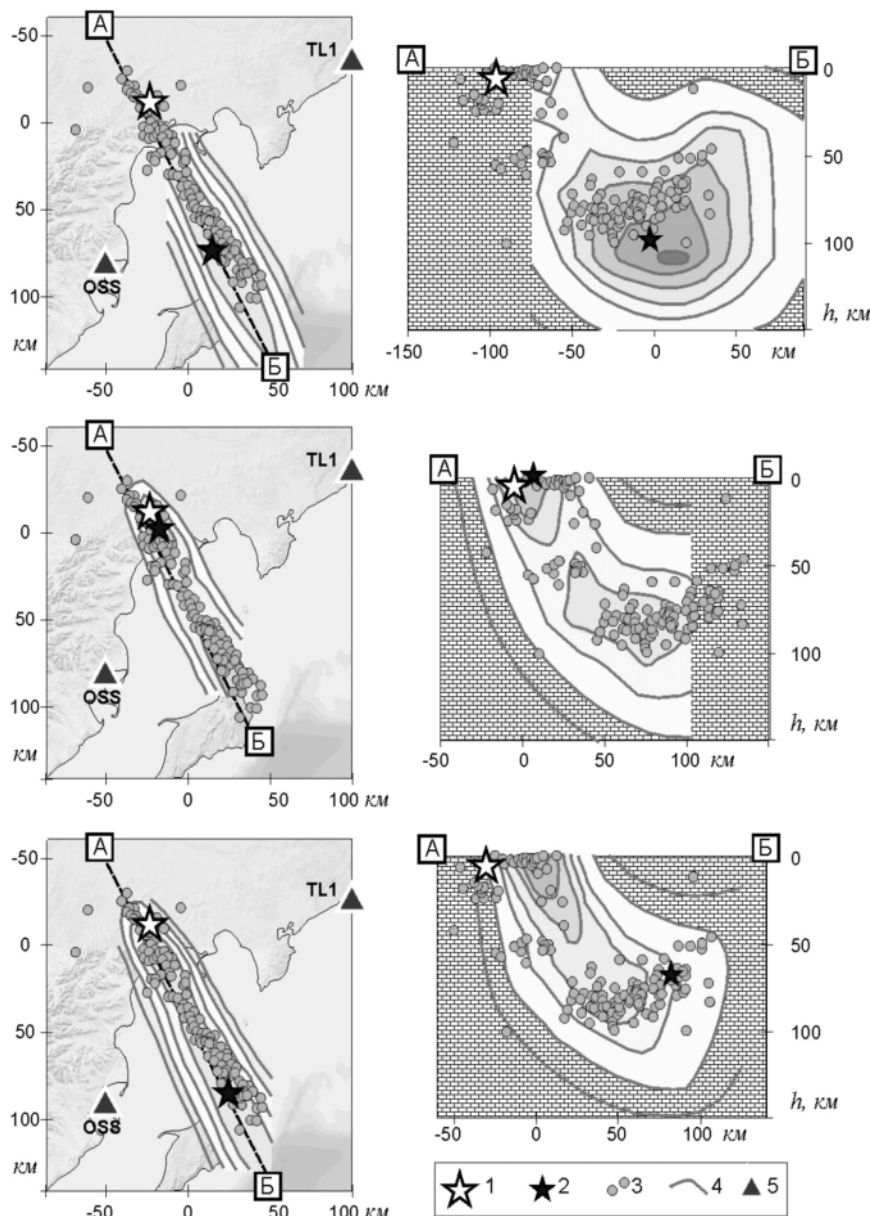


Рис. 12. Примеры конфигурации облака невязок при расчете гипоцентра афтершока Ильпырского землетрясения программой НММ

Звезды – положение Ильпырского землетрясения (1) и афтершока, для которого ведется расчет (2). Карта и разрез вдоль полосы афтершоков (3) по линии А-В представлены по результатам первичной оперативной обработки. Изолинии (4) очерчивают доверительную область решений для разного уровня допустимых ошибок времен прихода для рассматриваемого афтершока. Увеличение насыщенности цвета заливки соответствует уменьшению невязки. На карту нанесены две ближайшие сейсмические станции (5).

Заключение. 13 марта 2013 г. в районе перешейка, соединяющего п-ов Камчатка с материковой частью Северной Евразии, произошло сильное ($M_{w, \text{пер}}=5.8$, $ML=6.2$) близповерхностное сейсмическое событие – Ильпирское землетрясение. Оно является сильнейшим для этого района Камчатского края за годы детальных сейсмологических наблюдений (1961–2013 гг.). Макросейсмическая интенсивность сотрясений при Ильпирском землетрясении достигала 6–7 баллов на эпицентральной расстоянии ~ 30 км, а расчетная интенсивность колебаний в эпицентральной зоне оценена равной $I_0^p=7.5$ –8 баллов при $h=24$ км и $I_0^p=9$ баллов при $h=10$ км. Эти значения близки к максимально возможным по ОСР–2016 для Камчатского перешейка ($I=8$ баллов по ОСР-А и ОСР-В, $I=9$ баллов по ОСР-С) [40]. Первичная обработка афтершоков Ильпирского землетрясения привела к артефакту, который удалось идентифицировать и своевременно устранить. При этом потребовался дополнительный анализ сейсмологического материала и перерасчет значительного числа гипоцентров. Проведенная обширная работа позволила развеять опасения, связанные с развитием очага потенциального сильного ($M\sim 7.5$) землетрясения в районе Карагинского залива. Представленный опыт может быть полезен при анализе и интерпретации линейно протяженных кластеров землетрясений неясного генезиса.

В КФ ФИЦ ЕГС РАН выполнен анализ афтершокового процесса Ильпирского землетрясения, определен механизм очага, собрана и систематизирована макросейсмическая информация, обобщен опыт оперативной обработки афтершоков. Полученные данные позволяют увязать это землетрясение с представлениями о региональной тектонике.

Ильпирское землетрясение произошло вблизи западной границы Корякского сейсмического пояса, где полоса рассеянной сейсмичности маркирует зону взаимодействия малой плиты Берингии с Охотской и (севернее) Северо-Американской плитами. Коллизионный характер тектонических движений в этой части границы плит подтверждается механизмами землетрясений, большинство из которых имеют взбросовый характер с субширотным или северо-западным направлением оси сжатия. Однако механизм очага Ильпирского землетрясения (взбросо-сдвиг с субгоризонтальной осью сжатия северо-восток – юго-западного направления) и его афтершоковое облако, вытянувшееся в направлении с северо-запада на юго-восток, противоречат тектонике Корякского сейсмического пояса. Ильпирское землетрясение – первое инструментально зарегистрированное столь представительное сейсмическое событие с механизмом очага, соответствующим северо-восточному сжатию на предполагаемой границе Охотской и Северо-Американской литосферных плит, пересекающей Камчатский перешеек. Оно является весомым аргументом в пользу прохождения здесь указанной границы.

Л и т е р а т у р а

1. Сениюков С.Л., Дрознина С.Я. (отв. сост.), Карпенко Е.А., Леднева Н.А., Назарова З.А., Кожевникова Т.Ю., Митюшкина С.В., Напылова Н.А., Раевская А.А., Ромашева Е.И. (сост.). Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
2. Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Единая информационная система сейсмологических данных. – URL: <http://www.emsd.ru/sdis>
3. Абубакиров И.Р., Павлов В.М. (сост.). Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2013 г., определенных по волновым формам // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
4. International Seismological Centre, Thatcham, Berkshire, United Kingdom, 2015 [Сайт]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
5. USGS National Earthquake Information Center – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
6. Global CMT Catalog (GCMT) [Сайт]. – URL: <http://www.globalcmt.org/>
7. Сильные камчатские землетрясения 2013 г. / Под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2014. – 252 с.
8. Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага). Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
9. Сейсмологический бюллетень (сеть телесеизмических станций), 2013 // ФИЦ ЕГС РАН [Сайт]. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2013

10. **Дрознин Д.В., Дрознина С.Я.** Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS. // Сейсмические приборы. – 2010. – **46**. – № 3. – С. 22–34.
11. **Ландер А.В., Левина В.И., Иванова Е.И.** Сейсмическая история Корякского нагорья и афтершоковый процесс Олюторского землетрясения 20(21) апреля 2006 г. $M_w=7.6$ // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 2. – С. 16–30.
12. **Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю.** Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 41–64.
13. **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 г. – М.: Наука, 1973. – С. 195–208.
14. **Martin M.E., Weiss R., Bourgeois J., Pinegina T.K., Houston H., Titov V.V.** Combining constraints from tsunami modeling and sedimentology to untangle the 1969 Ozernoi and 1971 Kamchatskii tsunamis // Geophysical Research Letters. – 2008. – **35**. – L01610. – doi:10.1029/2007GL032349.
15. **Левина В.И., Ландер А.В., Иванова Е.И., Митюшкина С.В., Титков Н.Н.** Олюторское землетрясение 20 апреля 2006 г. с $M_w=7.6$ $I_0=9-10$ (Корякское нагорье) // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 314–329.
16. **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. – М.: Наука, 1994, Вып. 26. – С. 103–122.
17. **Mackey K.G., Fujita K., Gunbina L.V., Kovalev V.N., Imaev V.S., Kozmin B.M., Imaeva L.P.** Seismicity of the Bering Strait region: evidence for a Bering block // Geology. – 1997. – V. **25**. – P. 979–982.
18. **Гордеев Е.И., Пинегина Т.К., Ландер А.В., Кожурин А.И.** Берингия: сейсмическая опасность и фундаментальные вопросы геотектоники // Физика Земли. – 2015. – № 4. – С. 58–67.
19. **Павлов В.М., Абубакиров И.Р.** Алгоритм расчета тензора сейсмического момента сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам объемных волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2012. – № 2 (20). – С. 149–158.
20. **IRIS Global Seismograph Network GSN–IRIS/USGS** – URL: <https://doi.org/10.7914/SN/IU>
21. **ARN Alaska Regional Network** – URL: <https://doi.org/10.7914/SN/AK>
22. **Bormann P., Dewey J.W.** The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes. IS3.3. NMSOP2. Potsdam, GFZ, German Research Centre for Geosciences. – 2014. – 44 p.
23. **Kagan Y.** Simplified algorithms for calculating double-couple rotation // Geophys. J. Int. – 2007. – **171**. P. 411–418.
24. **Артёмова А.И., Габсатарова И.П., Гилёва Н.А., Гладырь Ж.В., Иванова Е.И., Лескова Е.В., Малянова Л.С., Сафонов Д.А., Середкина А.И.** Механизмы очагов отдельных землетрясений России // Землетрясения России в 2013 г. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 197–208.
25. **Чеброва А.Ю. (отв. сост.), Иванова Е.И., Митюшкина С.В. (сост.).** Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
26. **Ландер А.В.** Комплекс программ определения механизмов очагов землетрясений и их графического представления // Отчет «Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов в 2003 г.» – Фонды КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2004. – С. 359–380.
27. **Гусев А.А., Мельникова В.Н.** Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 6. – С. 55–63.
28. **Wells D.L., Coppersmith K.J.** New empirical relationships among Magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // BSSA. – 1994. – V. **84**. – № 4. – P. 974–1002.
29. **Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
30. **Писаренко В.Ф.** О законе повторяемости землетрясений // Дискретные свойства геофизической среды. – М.: Наука, 1989. – С. 47–60.
31. **Салтыков В.А.** О проблеме оценки пространственно-временных особенностей представительности каталога землетрясений // Материалы XIII Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных». Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 237–242.

32. **Bath M.** Lateral inhomogeneities of the upper mantle // *Tectonophysics*. – 1965. – V. 2. – № 6. – P. 483–514.
33. **Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М.** Сеймотектонический анализ Яно-Индибирского сегмента зоны Черского // *Физика Земли*. – 2011. – № 12. – С. 23–36.
34. **Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С., Маккей К.Г.** Сеймотектонические исследования плейстоценовой области Илин-Тасского землетрясения с $M_S = 6.9$ (северо-восток Якутии) // *Физика Земли*. – 2016. – № 6. – С. 39–53.
35. **Митюшкина С.В. (отв. сост.), Раевская А.А. (сост.)**. Макросейсмический эффект ощутимых землетрясений в населенных пунктах Камчатки в 2013 г. // *Землетрясения Северной Евразии*. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
36. **Митюшкина С.В., Раевская А.А.** Макросейсмические проявления Ильпирского землетрясения 13 марта 2013 г. ($M_w=5.8$) на территории Камчатского края // *Землетрясения Северной Евразии*. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
37. **Чебров Д.В., Чеброва А.Ю., Матвеев Е.А., Дрознина С.Я., Митюшкина С.В., Гусев А.А., Салтыков В.А., Воропаев П.В.** Камчатка и Командорские острова // *Землетрясения Северной Евразии*. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 198–213. doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.17
38. **Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности.** ГОСТ Р 57546–2017. – М.: Стандартинформ, 2017. – 27 с.
39. **Федотов С.А., Шумилина Л.С.** Сейсмическая сотрясаемость Камчатки // *Физика Земли*. – 1971. – № 9. – С. 3–15.
40. **Уломов В.И., Богданов М.И., Трифионов В.Г., Гусев А.А., Гусев Г.С., Акатова К.Н., Аптикаев Ф.Ф., Данилова Т.И., Кожурин А.И., Медведева Н.С., Никонов А.А., Перетокин С.А., Пустовитенко Б.Г., Стром А.Л.** Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных районах // *Инженерные изыскания в строительстве*. – 2016. – № 7. – С. 49–121.
41. **Мелекесцев И.В., Курбатов А.В.** Частота крупнейших палеосейсмических событий на северо-западном побережье и в Командорской котловине Берингова моря в позднем плейстоцене-голоцене // *Вулканология и сейсмология*. – 1997. – № 3. – С. 3–11.
42. **Викулин А.В.** Природный риск Северной Камчатки // *Тихоокеанская геология*. – 1998. – Т. 17. – № 2. – С. 85–92.
43. **Салтыков В.А.** Необычная сейсмическая активизация в Карагинском заливе (март – сентябрь 2013 г.) // *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г.* – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 195–199.
44. **Салтыков В.А., Дрознина С.Я.** Ильпирское землетрясение 13 марта 2013 г. $M_w=5.8$ (Северная Камчатка): аномальная протяженность очаговой зоны как артефакт // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. – 2014. – №. 2. – Вып. 24. – С. 130–136.

METADATA IN ENGLISH

ILPYRSKOE EARTHQUAKE March 13, 2013 with $M_{w,reg}=5.8$, $ML=6.2$,

$K_S=13.9$, $I_0^P=8$ (Kamchatsky Isthmus)

Yu.A. Kugaenko¹, S.Ya. Droznina¹, V.A. Saltykov¹, V.M. Pavlov¹,

A.V. Lander², S.V. Mityushkina¹, I.R. Abubakirov¹

¹*GS RAS, Kamchatka Branch, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, ku@emsd.ru*

²*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS, Moscow, Russia, land@mitp.ru*

Abstract. The strong ($M_{w,reg}=5.8$, $ML=6.2$) near-surface seismic event (Ilpyrskoye earthquake) occurred at 03^h12^m on 13 March, in the Kamchatka Isthmus. It was the strongest earthquake between 1962 and 2013 for this area. The greatest macroseismic effect was observed at a distance of ~30 km, $I=6-7$ on the scale MSK-64. We used two independent methods for determining its regional focal mechanism: 1) regional moment tensor in-

version using broadband waveforms; 2) solution based on polarities of the P waves. The results are similar: the focal mechanism of Ilypyskoye earthquake is thrust faulting with strike-slip component; the compression axis is subhorizontal and is oriented in the north-east – south-west direction. The mechanisms for the two strongest aftershocks were also identified, as a result, a change in focal movements during the aftershock process was revealed. The analysis of the aftershock process which consists of two stages with different decay character was performed. The process lasted ~ 75 days. About 200 aftershocks $ML=3.0-5.7$ ($K_S=7.5-12.9$) were recorded, hypocenter depth estimations vary from 0 to 10 km for about 80 % of them. The strongest aftershock was on May 6, 2013 with $ML=5.7$, $M_{w_{\text{рег}}}=4.8$, at which the change in focal movements occurred. According to the results of near real time processing, aftershock cloud of Ilypyskoye earthquake had a pronounced linearity and a great length, which was an artifact. The main cause of the artifact is the minimum number of stations involved in determining the hypocenters of most aftershocks and their quasi-linear disposition. The confidence areas within which solutions are equivalent are shown. We concluded that Ilypyskoye earthquake is a serious argument that the area of compression between the Okhotsk and North American plates is extended further to the east and the border passes through the Kamchatka Isthmus.

Keywords: Ilypyskoye earthquake, lithospheric plate boundary, source mechanism, tectonic position, aftershock process, macroseismicity, artifact, Kamchatka Isthmus.

DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.31

For citation: Kugaenko, Yu.A., Droznina, S.Ya., Saltykov, V.A., Pavlov, V.M., Lander, A.V., Mityushkina, S.V., & Abubakirov, I.R. (2019). Ilypyskoye earthquake March 13, 2013 with $M_{w_{\text{рег}}}=5.8$, $ML=6.2$, $K_S=13.9$, $I_0^P=8$ (Kamchatsky Isthmus). *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), 343–361. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.31

R e f e r e n c e s

1. Senyukov, S.L., Droznina, S.Ya., Karpenko, E.A., Ledneva, N.A., Nazarova, Z.A., Kozhevnikova, T.Yu., Mityushkina, S.V., Napylova, N.A., Raevskaya, A.A., & Romasheva, E.I. (2019). Earthquakes Catalogue for Kamchatka and the Komandor's islands in 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22(2013), Appendix on CD. (In Russ.).
2. Kamchatka Branch of GS RAS. (2019). Seismological Data Information System. Retrieved from: <http://www.emsd.ru/sdis>
3. Abubakirov, I.R., & Pavlov, V.M. (2019). Focal mechanism Catalogue for Kamchatka and the Komandor's islands in 2013, defined by broadband waveforms. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22(2013), Appendix on CD. (In Russ.).
4. International Seismological Centre. (2019). On-line Bulletin, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom. Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
5. USGS National Earthquake Information Center. (2019). Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
6. Ekström, G., Nettles, M., & Dziewoński, A. M. (2012). The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200, 1–9.
7. Chebrov, V.N. (2014). *Sil'nyye kamchatskiye zemletryaseniya 2013 g* [Strong Kamchatka earthquakes of 2013]. Petropavlovsk-Kamchatsky: Novaya kniga Publ., 252 p.
8. Medvedev, S.V. Shponhoyer, V., & Karnik, V. (1965). *Shkala seysmicheskoy intensivnosti MSK-64* [MSK-64 seismic intensity scale]. Moscow: MGK Academy of Sciences USSR Publ., 11 p.
9. GS RAS, Bulletin of Teleseismic Stations. (2019). Retrieved from ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2013/
10. Droznin, D.V., & Droznina, S.Ya. (2011). Interactive DIMAS Program for Processing Seismic Signals. *Seismic Instruments*, 47(3), 215–224. doi: 10.3103/S0747923911030054.
11. Lander, A.V., Levina, V.I., & Ivanova, E.I. (2010). The earthquake history of the Koryak Upland and the aftershock process of the MW 7.6 April 20(21), 2006 Olyutorskii earthquake. *Journal of Volcanology and Seismology*, 4(2), 87–100. doi: <https://doi.org/10.1134/S074204631002003X>
12. Levina, V.I., Lander, A.V., Mityushkina, S.V., & Chebrova, A.Yu. (2013). The seismicity of the Kamchatka region: 1962–2011, *Journal of Volcanology and Seismology*, 7(1), 37–57. doi: <https://doi.org/10.1134/S0742046313010053>
13. Fedotov, S.A., Gusev, A.A., Zobin, V.M., Kondratenko, A.M., & Chepkunas, K.E. (1973). [Ozernovskoe earthquake and tsunami on November 22 (23), 1969]. In *Zemletryaseniya v SSSR v 1969 g.* [Earthquakes in the USSR in 1969] (pp. 195–208). Moscow: Nauka Publ. (In Russ.).

14. Martin, M.E., Weiss, R., Bourgeois, J., Pinegina, T.K., Houston, H., & Titov, V.V. (2008). Combining constraints from tsunami modeling and sedimentology to untangle the 1969 Ozernoi and 1971 Kamchatskii tsunamis. *Geophysical Research Letters*, 35, L01610. doi: 10.1029/2007GL032349.
15. Levina, V.I., Lander, A.V., Ivanova, E.I., Mityushkina, S.V., & Titkov, N.N. (2012). [Oliutorskoe earthquake of April 20, 2006 with $M_w=7.6$ $I_0=9-10$ (Koryakskoe nagor'ye)]. In *Zemletryaseniia severnoi Evrazii v 2006 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia in 2006] (pp. 314–329). Obninsk: GS RAS Publ., (In Russ.).
16. Lander, A.V., Bukchin, B.G., Droznin, D.V., & Kiryushin, A.V. (1994). [Tectonic position and focal parameters of the Hailinskoe (Koryakskoe) earthquake on March 8, 1991: does a Beringia plate exist?]. *Vychislitel'naya seismologiya* [Computational seismology], 26, 103–122 (In Russ.).
17. Mackey, K.G., Fujita, K., Gunbina, L.V., Kovalev, V.N., Imaev, V.S., Koz'min, B.M., & Imaeva, L.P. (1997). Seismicity of the Bering Strait region: Evidence for a Bering block. *Geology*, 25 (11), 979–982.
18. Gordeev, E.I., Pinegina, T.K., Kozhurin, A.I., & Lander, A.V. (2015). Beringia: Seismic hazard and fundamental problems of geotectonics. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 51 (4), 512–521. doi: 10.1134/S1069351315030039.
19. Pavlov, V.M., & Abubakirov, I.R. (2012). [Algorithm for calculating the regional moment tensor inversion of strong earthquakes using broadband waveforms]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* [Vestnik KRAESC. Earth Sciences], 2 (20), 149–158. (In Russ.).
20. IRIS Global Seismograph Network GSN–IRIS/USGS (2019). Retrieved from: <https://doi.org/10.7914/SN/IU>
21. ARN Alaska Regional Network (2019). Retrieved from: <https://doi.org/10.7914/SN/AK>
22. Bormann, P., & Dewey, J.W. (2014). The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes. *IS3.3. NMSOP2. Potsdam, GFZ, German Research Centre for Geosciences.*, 44 p.
23. Kagan, Y.Y. (2007). Simplified algorithms for calculating double-couple rotation. *Geophysical Journal International*, 171(1), 411–418.
24. Artyomova, A.I., Gabsatarova, I.P., Gilyova, N.A., Gladyr, Z.V., Ivanova, E.I., Leskova, E.V., Mal'yanova, L.S., Safonov, D.A., & Seredkina, A.I. (2015) [Focal Mechanisms of Some Earthquake]. In *Zemletryaseniia Rossii v 2013 godu* [Earthquakes in Russia in 2013] (pp. 197–208). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
25. Chebrova, A.Yu., Ivanova, E.I., & Mityushkina, S.V. Catalogue of Earthquake Focal Mechanisms for Kamchatka and the Commander Islands in 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22(2013), Appendix on CD. (In Russ.).
26. Complex seismological and geophysical investigations of Kamchatka and Commander Islands (report 01.01.2003–31.12.2003) (2004). Petropavlovsk-Kamchatsky, Funds of KB GS RAS, 350 p. (In Russ.).
27. Gusev, A.A., & Melnikova, V.N. (1992). Relationships between magnitude scales for global and Kamchatkan earthquakes. *Volc. Seism*, 12, 723–733.
28. Wells, D.L., & Coppersmith, K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, 84 (4), 974–1002.
29. Fedotov, S.A. (1972). *Energeticheskaya klassifikatsiya Kurilo-Kamchatskikh zemletryasenyi i problema magnitud* [Energy classification of the Kurile-Kamchatka earthquakes and the problem of magnitudes]. Moscow: Nauka Publ., 117 p. (In Russ.).
30. Pisarenko, V.F. (1989). [On the law of repeatability of earthquakes]. *Diskretnyye svoystva geofizicheskoy sredy*. [Discrete properties of the geophysical environment] (pp. 47–60). Moscow: Nauka Publ. (In Russ.).
31. Saltykov, V.A. (2018). [On the problem of estimating the spatial and temporal characteristics of the representativeness of the earthquake catalog]. In *Materialy XIII Mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"*. [Proceedings of the XIII International Seismological School "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 237–242). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
32. Båth, M. (1965). Lateral inhomogeneities of the upper mantle. *Tectonophysics*, 2 (6), 483–514.
33. Imaeva, L.P., Imaev, V.S., & Koz'min, B.M. (2011). Seismotectonic analysis of the Yana-Indigirka segment of the Chersky zone. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 47 (12), 1045–1057. doi: 10.1134/S1069351311120056.

34. Imaeva, L.P., Koz'min, B.M., Imaev, V.S., & Mackey, K.G. (2016). Seismotectonic studies of the pleistoseist area of the $M_s=6.9$ Ilin-Tass earthquake in northeast Yakutia. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 52 (6), 821–835. doi: 10.1134/S1069351316050050.
35. Mityushkina, S.V., & Raevskaya, A.A. (2019). Macro seismic effects of sensible earthquakes in Kamchatka settlements in 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22(2013), Appendix on CD. (In Russ.).
36. Mityushkina S.V., & Raevskaya A.A. (2019). Macro seismic effects of the March 13, 2013 Il'pyrskoe earthquake in Kamchatka. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22(2013), Appendix on CD. (In Russ.).
37. Chebrov, D.V., Chebrov, A.Yu., Matveenko, E.A., Droznina, S.Ya., Mityushkina, S.V., Gusev, A.A., Saltikov, V.A., & Voropaev, P.V. (2019). Kamchatka and Commander Islands. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), 198–213. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.17
38. GOST R 57546–2017. (2017). [State Standard 57546–2017. Earthquakes. Seismic intensity scale]. Moscow: Standardinform Publ., 27 p. (In Russ.).
39. Fedotov, S.A., & Shumilina, L.S. (1971). [Kamchatka's seismic vibrability]. *Fizika Zemli*. [Izvestiya. Physics of the Solid Earth], 9, 3–15. (In Russ.).
40. Ulomov, V.I., Bogdanov, M.I., Trifonov, V.G., Gusev, A.A., Gusev, G.S., Akatova, K.N., Aptikaev, F.F., Danilova, T.I., Kozhurin, A.I., Medvedeva, N.S., Nikonov, A.A., Peretokin, S.A., Pustovitenko, B.G., & Strom, A.L. (2016). [The Seismic zoning of Russian Federation. Explanatory note to the set of maps of GSZ-2016 and the list of settlements located in the seismically active areas]. *Inzhenernye izyskaniia v stroitel'stve*. [Engineering surveys in construction], 7, 49–121. (In Russ.).
41. Melekestsev, I.V., & Kurbatov, A.V. (1997). [The frequency of the largest paleoseismic events on the northwestern coast and in the Commander basin of the Bering Sea in the Late Pleistocene – Holocene]. *Vulkanologiya i Seismologiya*. [Journal of Volcanology and Seismology], 3, 3–11. (In Russ.).
42. Vikulin, A. V. (2000). Natural Hazards in Northern Kamchatka. *Russian Journal of Pacific Geology*, 15 (2), 351–366.
43. Saltykov, V.A. (2013). [Unusual seismic activation in the Karaginsky Gulf (March - September 2013)]. In *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii*. [Problems of integrated geophysical monitoring of the Russian Far East. Proceedings of the IV Scientific and Technical Conference. Petropavlovsk-Kamchatsky. September 29 – October 5, 2013] (pp. 195–199). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
44. Saltykov, V.A., & Droznina, S.Ya. (2014). [The March 13, 2013 Ilpyrskoye Earthquake $M_w=5.8$ (The Northern Kamchatka): Abnormal Length of Focal Zone as an Artifact] *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. [Bulletin of KRAESC. Earth sciences], 24 (2), 130–136. (In Russ.).