

УДК 550.348. (571.66)

ВОСТОЧНО-КРОНОЦКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 16 МАРТА 2021 г., $M_w=6.5$

Д.В. Чебров¹, Е.А. Матвеев¹, И.Р. Абубакиров¹, С.Я. Дрознина¹, А.В. Ландер²,
С.В. Митюшкина¹, В.М. Павлов¹, А.А. Раевская¹, В.А. Салтыков¹

¹Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, raevs@emsd.ru

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия,
land@mitp.ru

Аннотация. В статье представлены инструментальные и макросейсмические данные по Восточно-Кроноцкому землетрясению 16 марта 2021 г., $ML=6.6$, $M_w=6.5$, обсуждается его тектоническая позиция, продолжительность и особенности афтершокового процесса. По состоянию на конец 2021 г. землетрясение является одним из 15 мелкофокусных ($0 \leq h \leq 70$ км) событий с $ML \geq 6.5$, зарегистрированных в Камчатской сейсмофокальной зоне с начала детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 1961 году. Механизмы очага и значения моментной магнитуды M_w Восточно-Кроноцкого землетрясения и его сильнейших афтершоков получены по оригинальной методике расчета тензоров сейсмического момента, разработанной в КФ ФИЦ ЕГС РАН. Восточно-Кроноцкое землетрясение не вызвало жертв и разрушений и ощущалось с интенсивностью I от 1–2 до 5 баллов по шкале ШСИ-17 в 17 населенных пунктах на расстоянии от эпицентра $\Delta=141$ –386 км. Максимальная интенсивность сотрясений $I=5$ баллов зафиксирована на кордоне Кроноки Кроноцкого государственного заповедника ($\Delta=141$ км). Магнитуда Восточно-Кроноцкого землетрясения не превысила порога цунамигенности, на побережье п-ова Камчатка и прилегающих территориях волны цунами не наблюдались.

Ключевые слова: Камчатка, землетрясение, афтершоки, механизм очага, макросейсмика, пиковые амплитуды.

Для цитирования: Чебров Д.В., Матвеев Е.А., Абубакиров И.Р., Дрознина С.Я., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Павлов В.М., Раевская А.А., Салтыков В.А. Восточно-Кроноцкое землетрясение 16 марта 2021 г., $M_w=6.5$ // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – С. 309–320. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.29> EDN: VHYZYX

Введение. 16 марта 2021 г. в 18^h38^m UTC произошло сильное землетрясение ($ML^1=6.6$, $M_w=6.5$) с эпицентром в Тихом океане в ~80 км восточнее Кроноцкого п-ова и в ~50 км к востоку от эпицентра Кроноцкого землетрясения 1997 г. ($ML=7.0$, $M_w=7.8$) [3]. Гипоцентр землетрясения находился на глубине ~64 км в северной части Камчатской сейсмофокальной зоны [4]. По данным камчатского регионального каталога², событие 16 марта 2021 г. по состоянию на конец 2021 г. является одним из 15 мелкофокусных ($0 \leq h \leq 70$ км) землетрясений с $ML \geq 6.5$, зарегистрированных в Камчатской сейсмофокальной зоне с начала детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 1961 г., включая Кроноцкое землетрясение 1997 г., сильнейшее за этот период событие Восточной Камчатки. Землетрясение 16 марта 2021 г. получило название «Восточно-Кроноцкое» (далее – ВКЗ).

По оценкам, выполненным по регламентам Службы срочных донесений и Службы предупреждения о цунами³, магнитуда ВКЗ ($MS=6.7$, $MS_{20}^4=6.7$) была определена ниже порога цунамигенности⁵, поэтому тревога цунами не объявлялась. По данным Центра цунами Камчатского Управления гидрометеослужбы, на побережье п-ова Камчатка и прилегающих территориях волны цунами не наблюдались. ВКЗ не вызвало жертв и разрушений. Максимальная интенсивность⁶ сотрясений $I=5$ баллов была зафиксирована на ближайшем к эпицентру кордоне Кроноки в 141 км от эпицентра. За главным событием последовал афтершоковый процесс, продолжавшийся ~300 суток и завершившийся в январе 2022 года. Облако афтершоков ВКЗ протянулось на северо-восток от эпицентра ВКЗ и достигло восточной границы Камчатской сейсмофокальной зоны (рис. 1).

Задача данной работы – представить полученные данные о ВКЗ и результаты их анализа.

¹ Локальная магнитуда $ML=0.5-K_s-0.75$ [1], где K_s – энергетический класс по [2]

² Региональный каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>

³ Региональный информационно-обрабатывающий центр Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук»

⁴ Двадцатисекундная региональная магнитуда $MS(20R)$ [5]

⁵ $MS \geq 7.0$ по станции «Петропавловск» (ПЕТ)

⁶ Здесь и далее интенсивность I приводится по шкале ШСИ-17 [6]

Инструментальные данные. Инструментальный гипоцентр землетрясения определен по 68 фазам *P*-волн и 20 фазам *S*-волн, зарегистрированным региональной сетью сейсмических станций Камчатского филиала (КФ) ФИЦ ЕГС РАН [Приложение 1]. Параметры гипоцентра, центроида и оценки магнитуд ВКЗ по данным различных сейсмологических агентств приведены в табл. 1.

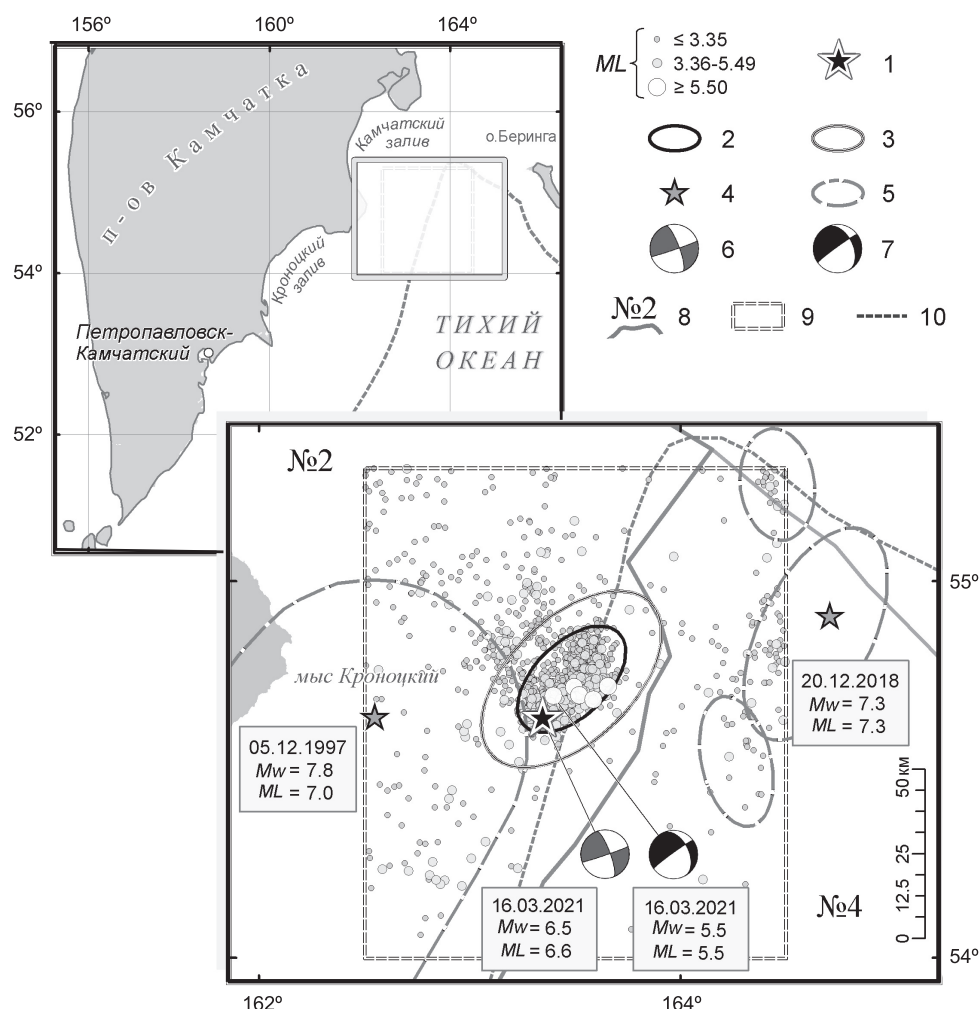


Рис. 1. Карта расположения эпицентра, афтершоков и очаговой области Восточно-Кроноцкого землетрясения (ВКЗ) в сопоставлении с эпицентрами и очаговыми областями Кроноцкого землетрясения 1997 г. и землетрясения Углового Поднятия 2018 г. (ЗУП)

1 – эпицентр ВКЗ; 2 – граница очага ВКЗ (2- σ эллипс рассеяния); 3 – граница афтершоковой области ВКЗ (3- σ эллипс рассеяния); 4 – эпицентры Кроноцкого землетрясения 1997 г. и ЗУП; 5 – границы очагов землетрясений из п. 4 (в облаке афтершоков ЗУП выделены три обособленных кластера); 6 и 7 – диаграммы механизмов очагов ВКЗ и его сильнейшего афтершока 16 марта в $19^{\text{h}}51^{\text{m}}$ в равноплощадной проекции нижней полусферы; 8 – границы зон сейсмичности по Ландеру [4, 7]; 9 – граница района для оценки представительности каталога афтершоков ВКЗ; 10 – глубоководный желоб.

Таблица 1. Основные параметры Восточно-Кроноцкого землетрясения 16 марта 2021 г. по данным различных сейсмологических агентств

Агент-ство	t_0 , ч:мин:с	Гипоцентр (центроид)			Магнитуда/количество станций	Источник
		φ° , N	λ° , E	h , км		
KAGSR	18:38:21.16	54.64	163.34	64.3	$K_s=14.6/31$, $ML=6.6/31$, $M_w=6.5/28$	[Приложение 2]
GSRAS	18:38:24.80	54.72	162.99	71.0	$MPSP=6.7/84$, $MS=6.7/88$	[8]
NEIC	18:38:21.23	54.74	163.18	13.2	$M_{ww}=6.6/36$	[9]
GCMT	18:38:29.50	54.72	163.41	19.0	$M_w=6.6/174$	[9]
GFZ	18:38:22.31	54.80	162.96	15.0	$M_w=6.6/77$, $M=6.5/179$, $m_b=6.5/179$, $mB=6.8/173$, $M_{wmB}=6.6/173$, $M_{wp}=6.3/156$	[9]

Примечание. KAGSR – Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН; GSRAS – Национальный сейсмологический центр ФИЦ ЕГС РАН; NEIC – National Earthquake Information Center; GFZ – German Research Centre For Geosciences; GCMT – The Global CMT Project.

Оценки параметров сильных движений грунта при ВКЗ получены по записям акселерометров (каналы НН) сети Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН ([10], [Приложение 1]) в соответствии с методикой, описанной в [1]. Записи фильтровались в полосе частот 0.1–35 Гц, при этом использовался фильтр Баттерворта 4-го порядка. Инструментальная интенсивность I_a рассчитывалась по формуле $I_a = 2.5 \cdot \lg(a_{\text{пик}}) + 1.89$ [6], где $a_{\text{пик}}$ (см/с²) – максимальное пиковое ускорение на горизонтальных каналах.

Для ближайших от эпицентра станций ($\Delta \sim 180$ –190 км) наблюдаются более высокие пиковые амплитуды на севере от эпицентра (UK5, UK1, KBG) по сравнению с ВК1 на востоке–северо-востоке (табл. 2).

Таблица 2. Параметры сильных движений грунта для станций, записавших ВКЗ с амплитудой по ускорению $a_{\text{пик}} \geq 2$ см/с²

№	Название сейсмостанции	Код*	Δ, км	r, км	a _{пик} , см/с ²			v _{пик} , см/с			Ia, балл	I, балл
					Компонента			Компонента				
					Е	Н	З	Е	Н	З		
1	Усть-Камчатск Дельта	UK5	184	195	12.2	16.5	5.2	−1.62	−1.37	−0.71	4.9	4–5
2	Администрация УК	UK1	187	198	9.9	−12.2	−5.7	1.41	−1.37	0.70	4.6	
3	Крутоберегово	KBG	185	195	11.2	10.5	−5.1	−1.12	1.28	−0.71	4.5	4
4	Беринг	BK1	180	191	−5.3	−9.9	5.0	0.45	0.71	0.26	4.4	4
5	Жупаново	GPN	227	236	−5.4	5.5	−3.7	−0.61	0.48	−0.27	3.8	3–4
6	Тумрок Источники	TUMD	199	209	3.6	−3.3	2.6	0.47	−0.49	0.35	3.3	3
7	Мишенная	MSN	357	363	−3.8	3.7	−1.3	0.65	0.37	−0.23	3.3	–
8	Налычево	NLC	309	316	1.6	−3.0	−1.1	0.09	0.16	−0.36	3.1	0
9	Школа № 40	GK003	355	361	1.8	−2.5	−1.1	0.95	0.61	0.57	2.9	–
10	Ключи	KLY	244	252	−2.5	−2.1	1.8	−0.42	0.48	−0.21	2.9	3
11	Шипунский	SPN	278	285	2.4	1.6	−1.1	0.19	−0.36	−0.42	2.8	0
12	Козыревск	KOZ	271	279	−1.7	2.0	1.1	−0.59	0.71	0.37	2.7	0

Примечание. * – региональный код станции (<https://sdis.emsd.ru/map/stations> – карта пунктов наблюдений Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН); Δ – эпицентральное расстояние, r – гипоцентральное расстояние; $a_{\text{пик}}$ – максимальная амплитуда пикового ускорения; $v_{\text{пик}}$ – максимальная амплитуда пиковой скорости (значения пиковых скоростей получены путем интегрирования записей ускорений); I_a – инструментальная интенсивность сотрясений; I – наблюдаемая сейсмическая интенсивность (где «0» – не ощущалось, «–» – нет данных).

Тектоническая позиция, механизм и параметры очага. Эпицентр ВКЗ располагается восточнее Кроноцкого мыса на внутреннем склоне Камчатского желоба (рис. 2, врезка). 05.12.1997 г. в этом районе произошло Кроноцкое землетрясение с $M_w=7.8$. Его эпицентр находился также на склоне желоба, всего в 50 км западнее ВКЗ. Оба события принадлежат Камчатской сейсмофокальной зоне (рис. 2), отражающей субдукцию Тихоокеанской плиты под Камчатку (Охотскую плиту). ВКЗ произошло в пределах очаговой зоны Кроноцкого землетрясения 1997 г., точнее, на краю облака его афтершоков (рис. 1, рис. 2). В механизмах каждого из двух событий направление одной из главных осей – сжатия для Кроноцкого землетрясения и растяжения для ВКЗ (рис. 2) – близко к направлению субдукции (азимут $\sim 304^\circ$, [11, 12]).

Однако, несмотря на приведенные факты, очаговый процесс ВКЗ принципиально отличается от Кроноцкого землетрясения. Прежде всего, это отражено в тензорах сейсмического момента. Если для Кроноцкого землетрясения к направлению субдукции близка ось сжатия (304°), то для ВКЗ – ось растяжения (297°). Механизм первого близок к пологому надвику ($strike=202^\circ$, $dip=23^\circ$, $rake=74^\circ$ [13]), что приблизительно соответствует деформациям, предполагаемым на основной субдукционной границе между погружающейся океанической и перекрывающей континентальной плитами. Очаговые параметры ВКЗ иные: механизм ВКЗ близок к крутому левостороннему сдвигу ($strike=71^\circ$, $dip=86^\circ$, $rake=19^\circ$ (табл. 3, [Приложение 3]), простираение которого соответствует большой оси облака афтершоков этого землетрясения (рис. 1, рис. 2).

Принципиальные различия в механизмах двух пространственно близких событий, по-видимому, связаны с их глубиной. Из рис. 2 видно, что эти землетрясения произошли в разных горизонтах погружающейся плиты. Гипоцентр и облако наиболее надежно определенных афтершоков ($M_L \geq 4$) Кроноцкого землетрясения, по-видимому (учитывая точность), располагаются вдоль ее постепенно погружающейся на северо-запад кровли, в основном в верхних 10–15 км плиты. В противоположность этому облако сильнейших афтершоков и гипоцентр ВКЗ сосредоточены в основном в интервале глубин 40–65 км. Таким образом, ВКЗ является внутриплитным землетрясением.

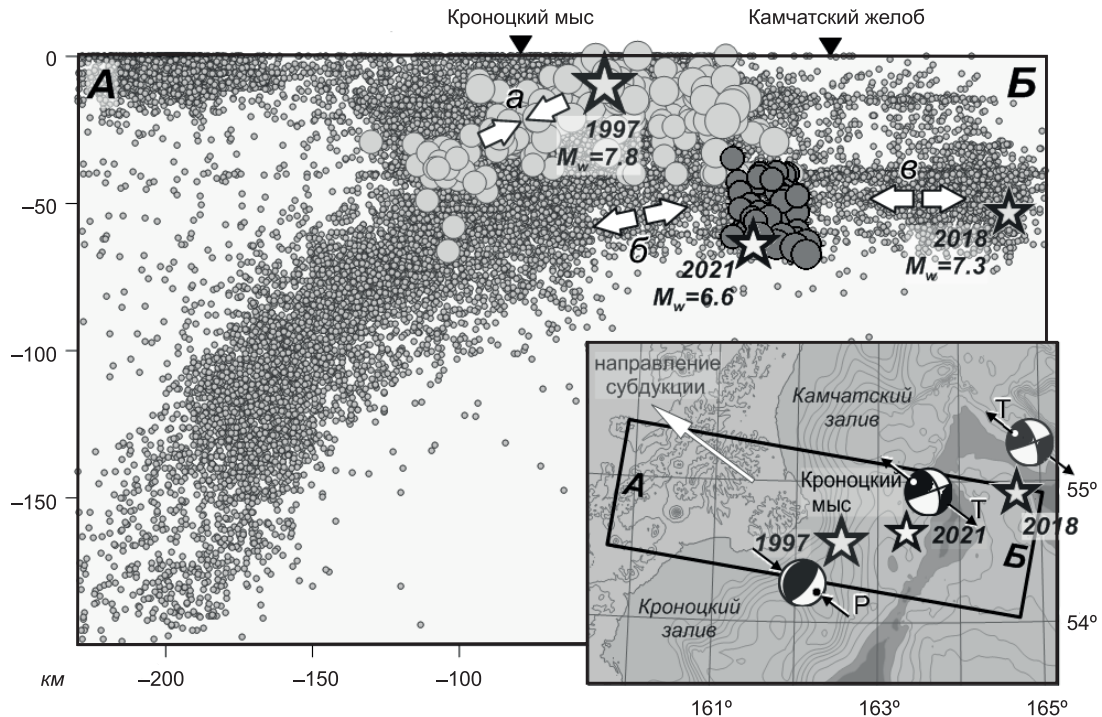


Рис. 2. Вертикальный разрез Камчатской сейсмофокальной зоны до глубины 200 км (по данным каталога землетрясений Камчатки и Командорских о-вов с 1962 г., мелкие кружки равного диаметра) и положение в ней облаков афтершоков Кроноцкого землетрясения 1997 г. (светло-серые кружки) и ВКЗ (темно-серые кружки). Звезды – гипоцентры главных толчков Кроноцкого землетрясения (левая), ВКЗ (средняя) и ЗУП (правая). На врезке прямоугольником показана область АБ, землетрясения которой включены в разрез. Подписаны годы возникновения землетрясений, их магнитуды; приведены диаграммы механизмов очагов основных толчков с главными осями, расположенными в направлении субдукции (Р (Pressure) – ось сжатия, Т (Tension) – ось растяжения). Двойные широкие стрелки на разрезе – предполагаемые напряжения в океанической плите, ориентированные в соответствии с углом погружения соответствующих главных осей, показанных на врезке (а – для Кроноцкого землетрясения 1997 г., б – для ВКЗ, в – для ЗУП 2018 г.)

Для лучшей интерпретации приведенных данных полезно рассмотреть еще одно сильное событие – землетрясение Угловое Поднятия (ЗУП), $M_w=7.3$, произошедшее 20 декабря 2018 г. примерно в 90 км восточнее ВКЗ [14]. Очаг этого события располагался за Камчатским желобом внутри Тихоокеанской плиты на глубинах ~15–55 км, а механизм обладал сходством с механизмом ВКЗ (рис. 2). Он также близок к крутому левостороннему сдвигу юго-западного простирания, а главная субгоризонтальная ось растяжения имеет направление 285° , близкое к направлению движения плиты. Таким образом, оба внутриплитных землетрясения – ВКЗ и ЗУП – произошли в нижнем (относительно кровли) горизонте Тихоокеанской плиты и, вполне вероятно, порождены близкими по типу полями тектонических напряжений.

ВКЗ относится к части плиты, уже погружившейся в зону субдукции, а ЗУП – к области, еще не начинавшей погружаться. Исходя из сходства механизмов очагов землетрясений, можно предположить (рис. 2), что в рассматриваемом регионе Тихоокеанская плита по обе стороны от Камчатского желоба в основном находится в состоянии растяжения в направлении своего движения, как в верхней части зоны субдукции, так и восточнее ее. Исключение составляет верхний горизонт погруженной плиты (мощностью ~15 км), испытывающий сцепление с висячим континентальным крылом зоны и, соответственно, сжатие в направлении перемещения. В этом верхнем горизонте происходит большое число субдукционных землетрясений и, в частности, Кроноцкое 1997 года. Изложенная схема для обсуждаемого региона требует дополнительных исследований на более широком материале.

В рамках приведенных данных и сделанных предположений внутриплитное ВКЗ произошло в горизонте погружающейся плиты, отстоящем от ее кровли на глубину ~20 км и испытывающем растяжение в направлении субдукции.

Сводка определений параметров и механизмов очага ВКЗ, полученных различными сейсмологическими агентствами, представлена в табл. 3. В КФ ФИЦ ЕГС РАН тензоры сейсмического момента (TCM) ВКЗ и его сильнейших афтершоков рассчитывались для тензоров типа DC (Double

Couple – двойной диполь без момента) и NT (Null Trace – тензор с нулевым следом) в соответствии с методикой RSMT (Regional Seismic Moment Tensor) [15, 16]. Для инверсии были использованы волновые формы широкополосных сейсмических станций Камчатки, Сахалина и сети GSN (Global Seismic Network) на Дальнем Востоке России. Определялись глубина h эквивалентного точечного источника, длительность τ временной функции источника, скалярный сейсмический момент M_0 и механизм очага. Значения моментной магнитуды M_w определялись пересчетом из M_0 по формуле $M_w = 2/3(\lg(M_0[H \cdot м]) - 9.1)$ [17].

Механизмы очагов во всех решениях близки между собой. Значения коэффициента Лодена-Надаи [18] в NT-решениях для главного события, полученные в КФ ФИЦ ЕГС РАН, GCMT [13] и NEIC [19] (табл. 3), лежат в пределах от -16% до -5% . Это означает, что недипольная составляющая в ТСМ мала, и полученные определения ТСМ близки к типу DC. Оценки моментной магнитуды составляют $M_w=6.5-6.6$. Значения глубины эквивалентного источника находятся в интервале $h=15-30.5$ км, а длительности временной функции источника укладываются в пределы $\tau=2-10$ с.

Афтершоковый процесс. На основании анализа каталога землетрясений за первый месяц с возникновения ВКЗ (рис. 1) для района с координатами $\varphi=54.0-55.3^\circ N$, $\lambda=162.5-164.5^\circ E$ получена оценка представительности $M^c=2.9$ при статистической значимости $\alpha=0.3$ (по методике [21]) (рис. 3).

По представительным данным была выделена афтершоковая область ВКЗ и построен огибающий ее 3- σ эллипс рассеяния (рис. 1). Внутри эллипса содержится ~ 500 афтершоков, в том числе наиболее сильное событие афтершоковой последовательности, зарегистрированное 16 марта 2021 г. в 19^h51^m , $ML=5.5$, $M_w=5.5$ (рис. 1). По параметрам 2- σ эллипса рассеяния афтершоков получена формальная оценка размера очага ВКЗ: длина (большая ось эллипса) – 40 км, ширина (меньшая ось) – 22 км.

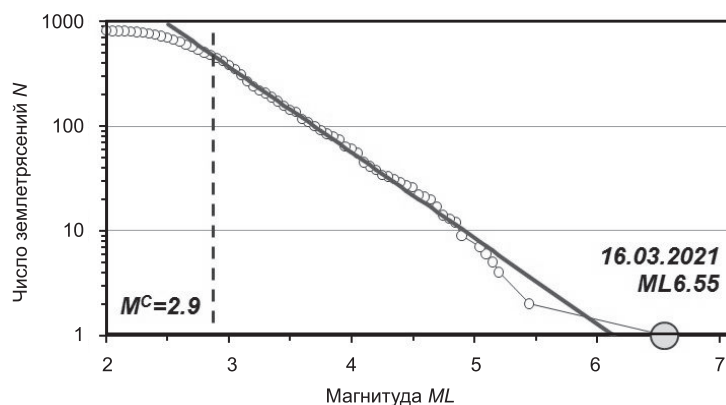


Рис. 3. Кумулятивный график повторяемости афтершоков ВКЗ за 16 марта – 16 апреля 2021 года. Сплошной линией показана аппроксимация, соответствующая закону Гутенберга-Рихтера. Вертикальная штриховая линия отмечает уровень представительности каталога $M^c=2.9$

Анализ временного хода афтершоков позволил выделить в нем три фазы (рис. 4):

1) в первые ≈ 6 суток (сут.) затухающий афтершоковый процесс в соответствии с законом Омори-Утсу с продуктивностью $A_1=74$ [22] (приведенное к представительной магнитуде каталога землетрясений Камчатки в целом $M^c=3.5$ $A_1=20$) и показателем $p=0.66$ [23, 24];

2) последующие ≈ 14 сут. – затухающий процесс по гиперболическому закону убывания афтершоков с $A_2=96$ (приведенное к $M^c=3.5$ $A_2=26$);

3) последующие ≈ 280 сут. – затухающий процесс по гиперболическому закону убывания афтершоков с $A_3=28$ (приведенное к $M^c=3.5$ $A_3=8$).

В целом афтершоковый процесс ВКЗ продолжался ~ 300 суток и завершился в январе 2022 года. В последующее время сейсмический поток можно рассматривать как однородный с постоянной скоростью $A_4=0.008$ (приведенное к $M^c=3.5$ $A_4=0.002$).

Механизмы и параметры очагов афтершоков ВКЗ с $ML \geq 5$ (16 марта в 19^h51^m с $ML=5.5$, $M_w=5.5$; 17 марта в 12^h32^m с $ML=5.2$, $M_w=4.7$; 18 марта в 02^h48^m с $ML=5.1$, $M_w=4.8$; 21 марта в 21^h13^m с $ML=5.1$, $M_w=4.9$; 5 апреля в 13^h43^m с $ML=5.2$, $M_w=4.6$) представлены в [Приложение 3]. ТСМ афтершока, произошедшего 18 марта в 00^h09^m , $ML=5.2$ не включен в каталог [Приложение 3] из-за существенного занижения (на 0.7 единицы) определения моментной магнитуды M_w относительно определения GCMT.

Таблица 3. Сводка определений механизмов и параметров очага землетрясения 16 марта 2021 г., $M_w=6.5$

№	Агентство, метод	Главные оси и главные значения (в ед. $10^{18} H_m$)										Механизм очага						M_w	$M_0 10^{18} H_m$	h , км	τ , с	η , %	Диаграмма механизма ТСМ	
		T			N			P				NP1		D1		NP2								D2
		azm°	pl°	E_N	azm°	pl°	E_P	azm°	pl°	stk°	dip°	$slip^\circ$	stk°	dip°	$slip^\circ$	$slip^\circ$								
		E_T	296	17	0	83	70	-6.93	203	10	71	86	19	339	71	175	6.5							
1	KAGSR, RSMT, DC	6.93	296	17	0	83	70	-6.93	203	10	71	86	19	339	71	175	6.5	6.93	15	2 ¹⁾	0			
2	KAGSR, RSMT, NT	7.07	297	17	-0.22	82	70	-6.85	203	11	71	86	20	339	70	175	6.5	6.96	15	2 ¹⁾	-5			
3	GCMT, NT	10.0	296	21	-1.0	89	66	-8.9	203	10	71	82	22	338	68	172	6.6	9.45	19	10 ²⁾	-16			
4	NEIC WP, NT	9.87	296	17	-0.78	132	73	-9.09	27	5	72	75	9	340	81	165	6.6	9.51	30.5	10 ²⁾	-16			

Примечание. DC – двойной диполь без момента; NT – тензор с нулевым следом; E_T , E_N , E_P – главные значения тензора; h – глубина эквивалентного точечного источника; τ – длительность временной функции источника; η – коэффициент Лодде-Надаи: $\eta = (2E_N - E_T - E_P) / (E_T - E_P) * 100\%$. WP – W-фаза, M_w – моментная магнитуда; M_0 – скалярный сейсмический момент; azm° , pl° – углы, задающие ориентацию главных осей напряжений T, N, P; stk° , dip° , $slip^\circ$ – углы, задающие ориентацию нодальных плоскостей и подвижки механизма. В правом столбце приведены соответствующие диаграммы тензора сейсмического момента в равноплощадной проекции нижней полусферы.

¹⁾ – результат расчета; ²⁾ – по корреляционной зависимости из работы [20].

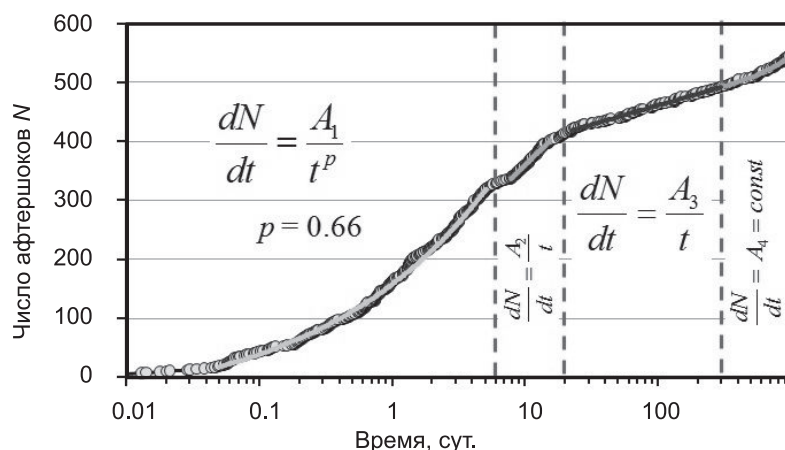


Рис. 4. Кумулятивный график числа землетрясений в пределах 3- σ эллипса рассеяния (рис. 1), отражающий три фазы афтершокового процесса и его завершение. Время отсчитывается от ВКЗ. Сплошной линией на участке 0.01–6 сут. показана аппроксимация в соответствии с законом Омори-Утсу; сплошными линиями на участках 6–20 и 20–300 сут. – аппроксимация в соответствии с гиперболическим законом убывания афтершоков. Пунктиры разграничивают участки с различными режимами убывания афтершоков

Макросейсмические данные. Сведения о макросейсмическом проявлении ВКЗ собраны с помощью интернет-опросника [25] для 37 пунктов Камчатского края, включая населенные пункты, кордоны Кроноцкого заповедника, маяки и гидрометеорологические станции (ГМС). Из различных источников обработано 61 сообщение, по которым составлена карта макросейсмического проявления события в населенных пунктах (рис. 5 (а, б)). Землетрясение ощущалось с интенсивностью I от 1–2 до 5 баллов в 17 населенных пунктах, расположенных на восточном побережье полуострова, в районе Центральной Камчатской депрессии и на о. Беринга, на расстояниях от эпицентра $\Delta=141$ –386 км (табл. 4, [Приложение 5]).

Самые сильные сотрясения $I=5$ баллов были зафиксированы в ближайшем к эпицентру пункте – кордоне Кроноки ($\Delta=141$ км). Люди проснулись от очень сильных колебаний (продолжительностью 20–30 сек), испугались, встали в безопасное место. Одноэтажное мелкоблочное здание кордона сотрясилось в целом. Колебалась тяжелая мебель, дверцы мебели, двери. Заметно раскачивались висящие предметы. Дребезжала, подпрыгивала посуда.

Сотрясения интенсивностью $I=4$ –5 баллов ощущались в п. Усть-Камчатск ($\Delta=185$ км), на кордонах Аэродром ($\Delta=178$ км) и Семячик ($\Delta=226$ км). В поселке отчетливые колебания разбудили многих спавших взрослых людей (землетрясение произошло утром в 6 часов 38 минут по местному времени). На первом этаже пятиэтажного здания администрации дежурный ЕДДС, находясь в покое, ощутил отчетливое дрожание, а его супруга, находившаяся дома в квартире на первом этаже панельной пятиэтажки, от землетрясения проснулась, разбудила детей. На втором этаже четырехэтажного блочного и пятиэтажного панельного многоквартирных зданий у очевидцев было ощущение сотрясения здания в целом, в помещении качались или постукивали различные предметы (висящие, легкие, тяжелые и малоподвижные, мебель, мебельные дверцы); колебалась жидкость в открытых сосудах; в крупноблочном здании скрипели полы, потолки или стены; беспокоились домашние животные; колебания продолжались 5–10 секунд.

В краевой столице – г. Петропавловске-Камчатском ($\Delta=357$ км) – землетрясение ощущалось с интенсивностью 3 балла. Сообщения об ощущениях поступили от жителей города, находившихся на 2–5 этажах многоквартирных зданий (панельных и крупноблочных). Большинство респондентов проснулось от слабых колебаний. На третьем этаже и выше наблюдалось слабое покачивание висящих и легких предметов, дрожание мебельных дверей, легкое покачивание незакрепленной мебели, небольших и неустойчивых предметов.

В афтершоковой последовательности ощущалось единственное событие 16 марта в 19^h51^m с $M_L=5.5$, $M_w=5.5$. Землетрясение ощущалось в двух населенных пунктах интенсивностью $I=3$ –4 балла – на кордоне Кроноки ($\Delta=144$ км) и в селе Никольское ($\Delta=175$ км, о. Беринга) [Приложение 5].

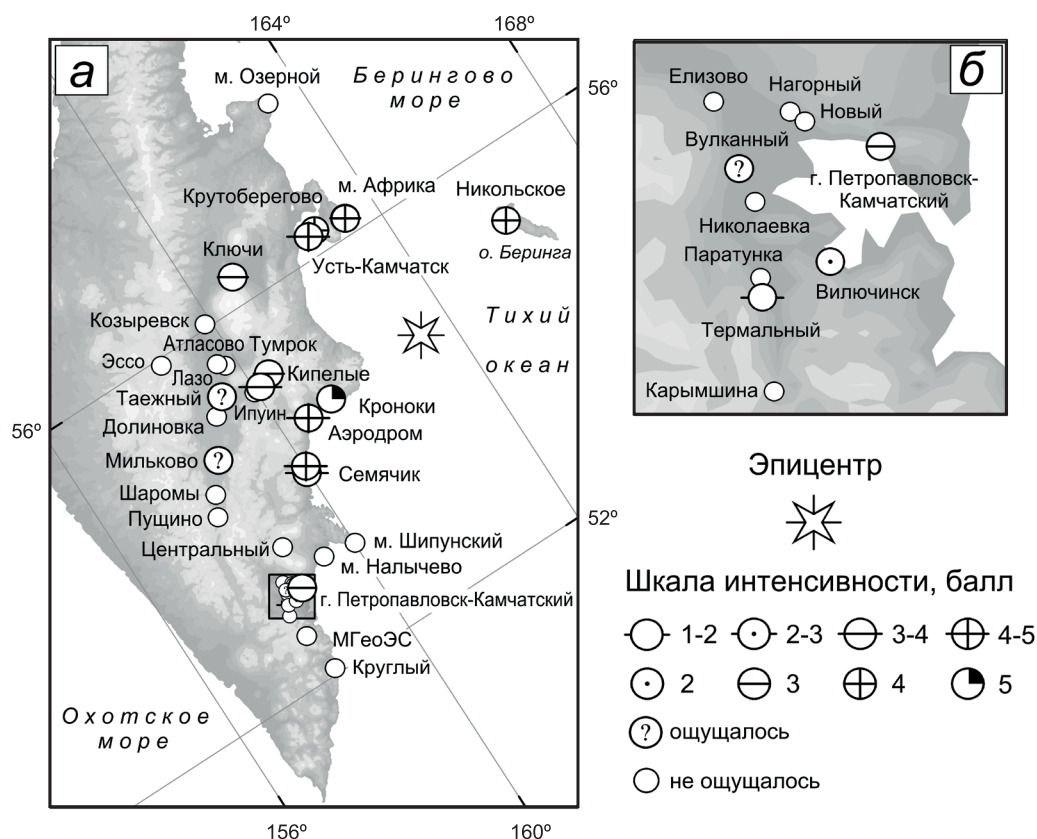


Рис 5. Карта макросейсмического проявления землетрясения 16 марта 2021 г. (а) и более детально – вблизи г. Петропавловска-Камчатского (б)

Таблица 4. Сводка оценок макросейсмической интенсивности землетрясения 16 марта 2021 г. в пунктах

№	Название пункта	Δ, км	Координаты		№	Название пункта	Δ, км	Координаты	
			φ°, N	λ°, E				φ°, N	λ°, E
5 баллов					16	Мильково	303	54.700	158.630
1	Кроноки (кордон)	141	54.591	161.162	17	Вулканный	370	53.094	158.348
4–5 баллов					Не ощущалось				
2	Аэродром (кордон)	178	54.550	160.582	18	Ипуин (кордон)	223	55.116	159.964
3	Усть-Камчатск	185	56.237	162.536	19	Лазо	249	55.539	159.762
4	Семячик (кордон)	226	54.108	159.979	20	Атласово	259	55.606	159.639
4 балла					21	Козыревск	270	56.049	159.870
5	м. Африка (ГМС)	171	56.182	163.354	22	м. Шипунский	277	53.110	160.010
6	Никольское	181	55.196	166.002	23	Долиновка	279	55.120	159.070
7	Крутоберегово	184	56.255	162.708	24	м. Налычево (кордон)	308	53.174	159.348
3–4 балла					25	Центральный (кордон)	324	53.510	158.760
8	Кипелые (кордон)	215	55.136	160.095	26	Эссо	327	55.928	158.700
9	Семячик (ГМС)	226	54.082	159.986	27	Шаромы	332	54.398	158.211
3 балла					28	м. Озерной (ГМС)	334	57.719	163.302
10	Тумрок (источники, кордон)	198	55.204	160.400	29	Пушино	349	54.177	158.007
11	Ключи	245	56.318	160.836	30	Нагорный	359	53.120	158.518
12	Петропавловск-Камчатский	357	53.020	158.650	31	Новый	359	53.099	158.535
2 балла					32	Елизово	363	53.183	158.383
13	Вилючинск	376	52.930	158.404	33	Николаевка	373	53.046	158.337
1–2 балла					34	Паратунка	383	52.960	158.252
14	Термальный	386	52.937	158.230	35	Карымшина (стационар КФ ФИЦ ЕГС РАН)	398	52.827	158.132
Ощущалось					36	МГеоЭС-1	412	52.538	158.202
15	Таежный	263	55.274	159.375	37	Круглый (маяк)	439	52.069	158.323

Примечание: м. – мыс; ГМС – гидрометеорологическая станция.

Заключение. Эпицентр Восточно-Кроноцкого землетрясения 16 марта 2021 г. с $M_L=6.6$, $M_w=6.5$ находился на западном склоне Камчатского глубоководного желоба. ВКЗ произошло в Камчатской сейсмофокальной зоне, сейсмичность которой связана с процессом субдукции Тихоокеанской океанической плиты под Охотскую. Тектоническая позиция очага ВКЗ приурочена к части Тихоокеанской плиты, уже погружившейся в зону субдукции. Основной толчок имел сдвиговый механизм юго-западного простирания с главной осью растяжения, расположенной в направлении погружения плиты. Характер механизма очага, глубина гипоцентра ~ 64 км и сходство с механизмом землетрясения Углового Поднятия 2018 г. позволили сделать вывод, что ВКЗ является внутриплитным событием, которое реализовалось в горизонте погружающейся Тихоокеанской плиты, отстоящем от ее кровли на глубину ~ 20 км и испытывающем растяжение в направлении субдукции.

ВКЗ ощущалось с интенсивностью I от 1–2 до 5 баллов по шкале ШСИ-17 в 17 населенных пунктах на расстоянии от эпицентра $\Delta=141$ –386 км. Максимальная интенсивность сотрясений $I=5$ баллов зафиксирована на кордоне Кроноки Кроноцкого государственного заповедника ($\Delta=141$ км), разрушений и пострадавших не было. Магнитуда ВКЗ не превысила порога цунамигенности, на побережье п-ова Камчатка и прилегающих территориях волны цунами не наблюдались.

На основании анализа представительного каталога афтершоков были оценены размеры очага ВКЗ ($\sim 40 \times 22$ км). Облако афтершоков вытянулось в северо-восточном направлении от эпицентра главного события и достигло восточной границы Камчатской сейсмофокальной зоны. Затухание афтершокового процесса ВКЗ в первые шесть дней после главного толчка соответствовало закону Омори-Утсу, а затем происходило по гиперболическому закону убывания афтершоков. В целом афтершоковый процесс продолжался ~ 300 суток и завершился в январе 2022 г.; за это время было зарегистрировано ~ 500 землетрясений с магнитудами $M^c \geq 2.9$. Наиболее сильный афтершок произошел 16 марта в $19^h 51^m$ ($M_L=5.5$, $M_w=5.5$) и ощущался на кордоне Кроноки ($\Delta=144$ км) и в селе Никольское ($\Delta=175$ км, о. Беринга) с интенсивностью $I=3$ –4 балла.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственных заданий № 124020900029-7 и № 075-00604-25) с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

В подготовке электронных приложений к данной статье принимали участие Д.В. Чебров, С.Л. Сеньюков, И.Р. Абубакиров, В.М. Павлов, С.Я. Дрознина, Е.А. Матвеев, С.В. Митюшкина, А.А. Раевская, Ю.В. Шевченко, Е.А. Карпенко, Т.Ю. Кожевникова, Н.А. Леднева, З.А. Назарова, Е.И. Ромашева, С.Г. Пойгина, Н.А. Лукаш, Г.М. Бахтиярова.

Электронное приложение App11_Kamchatka_2021 (<http://www.gsras.ru/zse/app-28.html>): 1 – Сейсмические станции сети Камчатки и Командорских островов в 2021 г.; 2 – Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2021 г.; 3 – Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2021 г.; 4 – Дополнение к каталогу механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов по данным ISC за 2021 г.; 5 – Макросейсмический эффект ощутимых землетрясений Камчатки и Командорских островов в населенных пунктах в 2021 г.; 6 – Сведения о пунктах, для которых имеется информация о макросейсмических проявлениях ощутимых землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2021 г.

Л и т е р а т у р а

1. 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.
2. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука. – 1972. – 117 с.
3. Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия. Под ред. Е.И. Гордеева, Б.В. Иванова, А.В. Викулина. – Издательство Камчатской государственной академии рыбопромыслового флота, 1998. – 294 с.
4. 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.
5. Чубарова О.С., Гусев А.А., Викулина С.А. Двадцатисекундная региональная магнитуда $MS(20R)$ для Дальнего Востока России // Сейсмические приборы. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 58–63.
6. ГОСТ Р 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 27 с.
7. Чебров В.Н., Дрознина С.Я., Сеньюков С.Л., Ландер А.В. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2013 году. – Обнинск, 2015. – С. 58–65. EDN: VBAERB

8. Сейсмологический бюллетень (сеть телесеismicических станций), 2021. (2025) // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. – URL: http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2021/
9. International Seismological Centre. (2025). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
10. Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сениюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 году // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 18–40.
11. Argus D.F., Gordon R.G., De Mets C. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2011. – N. 12. – P. 11–13. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011GC003751>
12. GAGE Plate Motion Calculator. (2025). [Site]. – URL: <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html>
13. Global Centroid Moment Tensor (GCMT). Catalog Search. (2025). [Site]. – URL: <https://www.globalcmt.org/>
14. Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В., Абубакиров И.Р., Дрознина С.Я., Митюшкина С.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К., Титков Н.Н. Землетрясение Углового Поднятия 20 декабря 2018 г. $M_w = 7.3$ в зоне сочленения Камчатского и Алеутского океанических желобов // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. – 2020. – Вып. 45 (№ 1). – С. 100–117. DOI: <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-1-45-100-117>
15. Абубакиров И.Р., Павлов В.М. Определение тензора момента двойного диполя для землетрясений Камчатки по волновым формам региональных сейсмических станций // *Физика Земли*. – 2021. – № 3. – С. 45–62. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333721030017>
16. Павлов В.М. Алгоритмы расчета синтетических сейсмограмм от дипольного источника с использованием производных функций Грина // *Физика Земли*. – 2017. – № 4. – С. 67–75.
17. Kanamori H. The energy release in great earthquakes // *Journal of Geophysical Research*. – 1977. – V. 82, N 20. – P. 2981–2987.
18. Юнга С.Л. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. – 1979. – № 10. – С. 7–25.
19. National Earthquake Information Center and Data Center for Seismology, Denver. (2025). [Site]. – URL: <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic>
20. Ekström G., Nettle M., Dziewonski A.M. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2012. – V. 200–201. – P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
21. Салтыков В.А. О возможных проблемах оценки пространственно-временных особенностей представительности каталога землетрясений (на примере Камчатского каталога Единой геофизической службы РАН) // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. – 2019. – № 3 (43). – С. 66–74. DOI: <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-3-43-66-74>
22. Баранов С.В., Шебалин П.Н. Закономерности постсейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков. – М.: РАН. – 2019. – 218 с.
23. Omori F. On the Aftershocks of Earthquakes // *Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo*. – 1894. – V. 7. – P. 111–120.
24. Utsu T. A statistical study on the occurrence of aftershocks // *Geophysical Magazine*. – 1961. – V. 30. – P. 521–605.
25. Митюшкина С.В., Токарев А.В., Раевская А.А., Чеброва А.Ю. Автоматическая обработка макросейсмической информации по камчатским землетрясениям на базе Интернет-опросника // *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 9–15 октября 2011 г.* / Отв. ред. Чебров В.Н. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 376–380.

EAST KRONOTSKY EARTHQUAKE on MARCH 16, 2021, $M_w=6.5$

**D.V. Chebrov¹, E.A. Matveenko¹, I.R. Abubakirov¹, S.Ya. Droznina¹, A.V. Lander²,
S.V. Mityushkina¹, V.M. Pavlov¹, A.A. Raevskaya¹, V.A. Saltykov¹**

¹*Kamchatka Branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, raevs@emsd.ru*

²*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, land@mitp.ru*

Abstract. The article presents instrumental and macroseismic data on the East Kronotsky earthquake of March 16, 2021, $ML=6.6$, $M_w=6.5$, discusses its tectonic position, duration and features of the aftershock process. As of the end of 2021, the earthquake is one of 15 shallow-focus ($0 \leq h \leq 70$ km) events with $ML \geq 6.5$ recorded in the Kamchatka seismofocal zone since the beginning of detailed seismological observations in Kamchatka in 1961. Focal mechanisms and moment magnitude values M_w of the East Kronotsky earthquake and its strongest aftershocks were obtained using the original method for calculating seismic moment tensors developed at the Kamchatka branch of Geophysical Survey RAS. The East Kronotsky earthquake did not cause casualties or destruction and was felt with an intensity I from 1–2 to 5 points on the SSI-17 scale in 17 settlements at a distance from the epicenter of $\Delta=141$ –386 km. The maximum intensity of tremors $I=5$ points was recorded at the Kronoki cordon of the Kronotsky State Nature Reserve ($\Delta=141$ km). The magnitude of the East Kronotsky earthquake did not exceed the tsunamigenicity threshold; no tsunami waves were observed on the coast of the Kamchatka Peninsula and adjacent territories.

Keywords: Kamchatka, seismicity, catalogue, earthquake, focal mechanism, macroseismic, seismicity level.

For citation: Chebrov, D.V., Matveenko, E.A., Abubakirov, I.R., Droznina, S.Ya., Lander, A.V., Mityushkina, S.V., Pavlov, V.M., Raevskaya, A.A., & Saltykov, V.A. (2025). [East Kronotsky earthquake on March 16, 2021, $M_w=6.5$]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021), 309–320. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.29> EDN: VHYZYX

References

1. Chubarova, O.S., Gusev, A.A., & Chebrov, V.N. (2010). Properties of ground vibrations during the Olyutor earthquake of 20.04.2006 and its aftershocks according to digital recording data. *Volcanology and Seismology*, 2, 57–70.
2. Fedotov, S.A. (1972). *Energeticheskaya klassifikatsiya Kurilo-Kamchatskikh zemletryaseniye i problema magnitud* [Energy classification of Kuril-Kamchatka earthquakes and the problem of magnitudes]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 117 p. (In Russ.).
3. Gordeev, E.I., Ivanov, B.V., & Vikulin, A.V. (1998). *Kronotskoye zemletryaseniye na Kamchatke 5 dekabrya 1997 g. Predvestniki, osobennosti. posledstviya* [Kronotsky earthquake in Kamchatka on December 5, 1997. Harbingers, features, consequences]. Publishing house of Kamchatka state academy of fishing fleet, 294 p. (In Russ.).
4. Levina, V.I., Lander, A.V., Mityushkina, S.V., & Chebrova, A.Yu. (2013). Seismicity of the Kamchatka region 1962–2011. *Volcanology and seismology*, 2, 41–64.
5. Chubarova, O.S., Gusev, A.A., & Vikulina, S.A. (2010). Twenty-second regional magnitude MS(20R) for the Russian Far East. *Seismic instruments*, 3(46), 58–63.
6. GOST R 57546–2017. (2017). [Earthquakes. Seismic Intensity Scale]. Moscow, Russia: Standardinform Publ., 27 p. (In Russ.).
7. Chebrov, V.N., Droznina, S.Ya., Senyukov, S.L., & Lander, A.V. (2015). [Kamchatka and the Commander Islands]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2013 godu* [Earthquakes in Russia, 2013] (pp. 58–65). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
8. GS RAS, Bulletin of Teleseismic Stations, 2021. (2025). Retrieved from http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2021
9. International Seismological Centre. (2025). On-line Bulletin. Retrieved from <https://doi.org/10.31905/D808B830>
10. Chebrov, V.N., Droznin, D.V., Kugaenko, Yu.A., Levina, V.I., Senyukov, S.L., Sergeev, V.A., Shevchenko, Yu.V., & Yashchuk, V.V. (2013). System of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011. *Volcanology and seismology*, 1, 18–40.
11. Argus, D.F., Gordon, R.G., & De Mets, C. (2011). Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12, 11–13. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011GC003751>
12. GAGE Plate Motion Calculator. (2025). Retrieved from <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html>
13. Global Centroid Moment Tensor (GCMT). Catalog Search. (2025). Retrieved from <https://www.globalcmt.org/>
14. Chebrov, D.V., Kugaenko, Yu.A., Lander, A.V., Abubakirov, I.R., Droznina, S.Ya., Mityushkina, S.V., Pavlov, V.M., Saltykov, V.A., Serafimova, Yu.K., & Titkov, N.N. (2020). [The Angular Uplift Earthquake of December 20, 2018 $M_w = 7.3$ in the Junction Zone of the Kamchatka and Aleutian Oceanic Trench]. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle* [Bulletin of KRAESC. Earth sciences], 1(45), 100–117. DOI: <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-1-45-100-117>

15. Abubakirov, I.R., & Pavlov, V.M. (2021). Determining the Double Couple Moment Tensor for Kamchatka Earthquakes from Regional Seismic Waveforms. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 57(3), 332–347. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1069351321030010>
16. Pavlov, V.M. (2017). The algorithms for calculation synthetic seismograms from a dipole source using the derivatives of Green's function. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 53(4), 556–564. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1069351317030077>
17. Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 82(20), 2981–2987.
18. Yunga, S.L. (1979). *O mekhanizme deformirovaniya seismoaktivnogo ob'yema zemnoy kory* [On the mechanism of deformation of the seismically active volume of the Earth's crust]. *Fizika Zemli* [Izvestiya. Physics of the Solid Earth], 10, 7–25. (In Russ.).
19. National Earthquake Information Center and Data Center for Seismology, Denver. (2025). Retrieved from <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic>
20. Ekström, G., Nettie, M., & Dziewonski, A.M. (2012). The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200–201, 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
21. Saltykov, V.A. (2019). [On possible problems of assessing the spatio-temporal features of the representativeness of the earthquake catalog (on the example of the Kamchatka catalog of the Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences)]. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle* [Bulletin of KRAESC. Earth sciences], 3(43), 66–74. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-3-43-66-74>.
22. Baranov, S.V., & Shebalin, P.N. (2019). *Zakonomernosti postseismicheskikh protsessov i prognoz opasnosti sil'nykh aftershokov* [Patterns of Post-Seismic Processes and Forecast of the Danger of Strong Aftershocks]. Moscow, Russia: RAS Publ., 218 p. (In Russ.).
23. Omori, F. (1894). On the Aftershocks of Earthquakes. *Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo*, 7, 111–120.
24. Utsu, T. (1961). A statistical study on the occurrence of aftershocks. *Geophysical Magazine*, 30, 521–605.
25. Mityushkina, S.V., Tokarev, A.V., Raevskaya, A.A., & Chebrova, A.Yu. (2011). *Automatic processing of macroseismic information on Kamchatka earthquakes based on an Internet questionnaire* [Automatic processing of macroseismic information on Kamchatka earthquakes based on an online questionnaire]. In *Trudy Tret'ej nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii"* [Proceedings of the 3rd Scientific and Technical Conference "Problems of complex geophysical monitoring of Far East of Russia"] (pp. 376–380). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).