

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ УГЛОВОГО ПОДНЯТИЯ 20 ДЕКАБРЯ 2018 г. $M_w = 7.3$ В ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ КАМЧАТСКОГО И АЛЕУТСКОГО ОКЕАНИЧЕСКИХ ЖЕЛОБОВ

© 2020 Д.В. Чебров¹, Ю.А. Кугаенко¹, А.В. Ландер², И.Р. Абубакиров¹, С.Я. Дрознина¹,
С.В. Митюшкина¹, В.М. Павлов¹, В.А. Салтыков¹, Ю.К. Серафимова¹, Н.Н. Титков¹

¹Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»,
Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006; email: danila@emsd.ru

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
Москва, Россия, 117485; email: land@mitp.ru

Представлены первые результаты комплексных исследований сильного сейсмического события, произошедшего 20.12.2018 г. в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, — землетрясения Углового Поднятия (ЗУП), имевшего магнитуду $M_w=7.3$. Приведены макро-сейсмические сведения о ЗУП, выполнены расчеты пиковых ускорений грунта и тензора сейсмического момента, кратко описаны форшоковый и афтершоковый процесс, обобщены данные о предвестниках землетрясения. ЗУП ощущалось на расстояниях до 500 км. Максимальная балльность составила $I=5-6$ на эпицентральной дистанции $\Delta \sim 90$ км на о. Беринга, где отмечено максимальное инструментально зарегистрированное ускорение ~ 60 см/сек². Показано, что удаленные во времени форшоки произошли за ~ 2 года до ЗУП. К особенностям длительного и интенсивного афтершокового процесса ЗУП отнесена ярко выраженная группируемость афтершоков в трех пространственно изолированных кластерах, характеризующихся различными параметрами временного хода сейсмичности. Сильнейший афтершок имел магнитуду $M_L=6.6$, еще 25 событий соответствовало $M_L \geq 5.0$. ЗУП предварялось предвестниковыми аномалиями в параметрах геофизических полей и сейсмического процесса. Получены оценки размеров очага ЗУП, величины очаговой подвижки, длительности разрыва. Тензор сейсмического момента ЗУП обладает большой недипольной составляющей.

Ключевые слова: землетрясение, афтершоки, форшоки, предвестники, механизм очага, цунами, Камчатка.

20 декабря 2018 г. в 17:01 UTC (21.12.2018 г. 05:01 по местному времени) на крайнем северо-западе Тихого океана, непосредственно южнее области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг, в зоне ответственности Камчатского филиала (КФ) Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) (Землетрясения ..., 2018) произошло сильное мелкофокусное землетрясение с магнитудой $M_w = 7.3$ (рис. 1, табл. 1). По данным КФ ФИЦ ЕГС РАН эпицентр землетрясения находился в океане в ~ 450 км к северо-востоку от г. Петропавловска-Камчатского и в ~ 90 км от ближайшего населенного пункта — села Никольское, расположенного на о. Беринга (Командорские о-ва).

Эпицентральная область землетрясения 20.12.2018 г. пересекла небольшое Угловое поднятие (Гнибиденко и др., 1980), возвышающееся на внешней (обращенной к океану) океанической стороне Камчатского и Алеутского желобов над районом их сочленения (рис. 1б). Поэтому рассматриваемое сейсмическое событие было названо землетрясением Углового Поднятия (ЗУП).

Разрушений и пострадавших в результате этого события нет. Землетрясение породило слабую волну цунами, инструментально зарегистрированную глубокоководными мореографами¹ на расстояниях 720–780 км от эпицентра.

¹ По данным National Data Buoy Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration <https://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml>

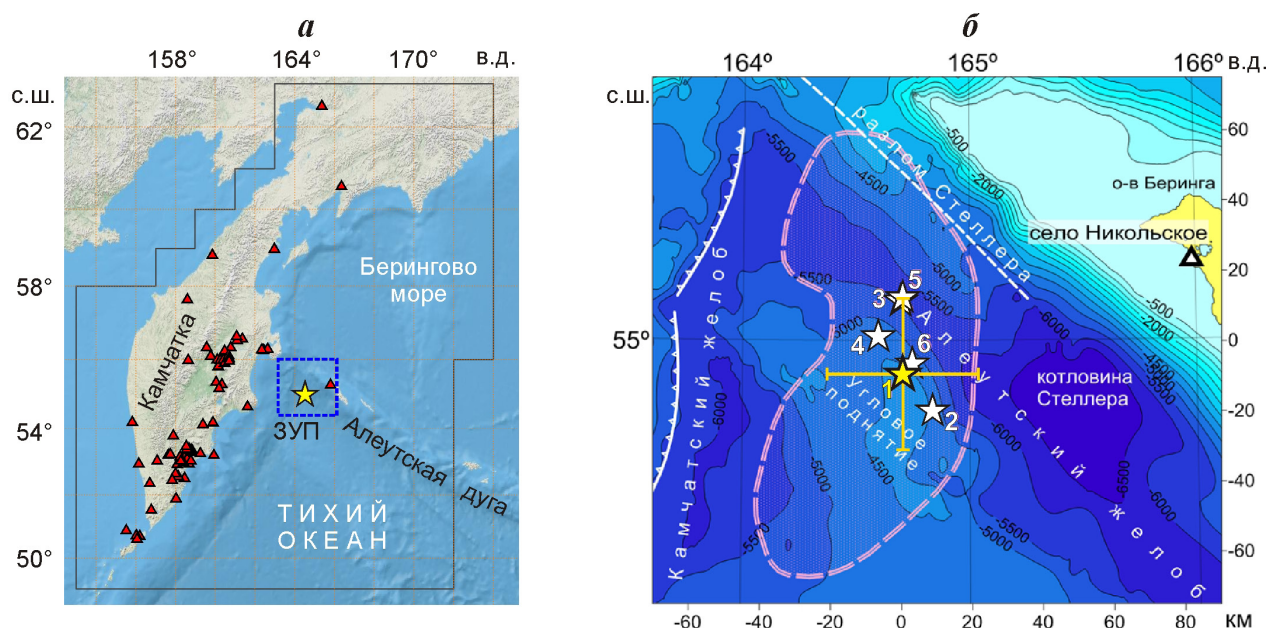


Рис. 1. Эпицентр землетрясения Углогового Поднятия (звезда), схема расположения Камчатской сети сейсмических станций и зона ответственности Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН (а). Пунктиром выделена область, представленная на рис. 1б. Положение эпицентра ЗУП по данным различных сейсмологических агентств (б). Номера при эпицентрах (звездах) соответствуют таблице 1. Контур ограничивает облако афтершоков ЗУП. Обозначения разломов приведены на рис. 4.

Fig. 1. The epicenter of the Uglovoye Podnyatiye earthquake (star), the location scheme of the Kamchatka network of seismic stations and the area of responsibility of the Kamchatka branch of the KB FRC UGS RAS (a) The dotted line marks the region shown in Fig. 1b. The position of the UPE epicenter according to various seismological agencies (b). The numbers at the epicenters (stars) correspond to table 1. The contour limits the cloud of aftershocks of the UPE. Fault designations correspond to Fig. 4.

На побережьях Камчатки и Командорских островов цунами не зафиксировано.

За основным толчком ЗУП последовала длительная и многочисленная серия афтершоков.

В работе представлены первые результаты комплексных исследований ЗУП, опирающиеся в основном на оригинальные данные КФ ФИЦ ЕГС РАН. Помимо Камчатской системы сейсмологических наблюдений (Чебров, 2013) использованы записи сейсмических станций Дальнего Востока России и мировой сети GSN (Global Seismographic Network, IRIS) в диапазоне эпицентральных расстояний до $\Delta \sim 2800$ км от ЗУП.

ОПЕРАТИВНАЯ ОБРАБОТКА ЗУП В КФ ФИЦ ЕГС РАН

Обработка ЗУП проведена по регламентам Службы срочных донесений (ССД) и Службы предупреждения о цунами (СПЦ) в КФ ФИЦ ЕГС РАН при превышении сейсмическим сигналом заданного уровня на станции «Крутоберегово» (КВГ), Через 3 минуты был проинформирован Камчатский центр цунами Росгидромета. Первая оценка параметров землетрясения была произведена через 5 минут 18 секунд. Была объявлена тревога цунами и проведено оповещение ГУМЧС

России по Камчатскому краю, ССД ФИЦ ЕГС РАН, ФГБУ «Камчатское УГМС» и др. Таким образом, обработка данного землетрясения, подача тревоги цунами и оповещение государственных служб были выполнены в течение 7 минут, что полностью соответствует требованиям регламента.

На побережьях Камчатки и Командорских островов цунами не зафиксировано. По данным NDBC NOAA на записях двух глубоководных станций системы раннего предупреждения о цунами DART, ближайших к эпицентру землетрясения, в расчетное время прихода волны цунами выделяются колебания, превышающие уровень шумов. На станции DART 21416² «Kamchatka peninsula», расположенной от эпицентра на расстоянии $\Delta = 783$ км по азимуту $Az = 210^\circ$, амплитуда этой волны достигла 7 мм, на станции DART 21415³ «Attu» ($\Delta = 722$ км, $Az = 123^\circ$) амплитуда колебаний уровня океана в расчетное время не превышала 4 мм.

Оценка интенсивности колебаний в населенных пунктах Камчатского края по инстру-

² https://www.ndbc.noaa.gov/station_page.php?station=21416

³ https://www.ndbc.noaa.gov/station_page.php?station=21415

ментальным данным была произведена согласно (Дроздин и др., 2017) и передана в ГУ МЧС «Камчатского края» через 13 минут после начала обработки.

Окончательная обработка ЗУП была проведена в течение суток. Полученные основные параметры землетрясения приведены в табл. 1. Моментная магнитуа $M_w = 7.3$ определена по широкополосным сейсмограммам по методике (Павлов, Абубакиров, 2012), $M_w = 7.4$ — по косейсмическим смещениям. Точность локации гипоцентра в плане и по глубине составила ~24 км. Эпицентр ЗУП находится в хорошем соответствии с решениями других мировых агентств (рис. 1б, табл. 1). Однако определение глубины не столь однозначно: в решениях зарубежных центров она не превышает 18 км (то есть ЗУП является коровым землетрясением), в то время как по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН, где использованы преимущественно данные близких камчатских станций, оно произошло на глубине 54 км.

Тензоры сейсмического момента для основного толчка ЗУП определены по записям волновых форм региональных широкополосных сейсмических станций. При расчете тензоров использован алгоритм (Павлов, Абубакиров, 2012, 2017), позволяющий определить также глубину h эквивалентного точечного источника и длительность его временной функции τ . При поиске решения рассматриваются две модели точечного источника: 1) двойной диполь без момента — DC (Double Couple tensor), 2) симметричный тензор с нулевым следом — NT (Null Trace tensor). Для второй модели результаты представлены в виде параметров *наилучшего* двойного диполя (Ekstrom et al., 2012) и коэффициента Лодэ-Надаи. В первой модели коэффициент Лодэ-Надаи фиксирован равным нулю, и рассчитываются непосредственно параметры двойного диполя, называемого *оптимальным* (Henry et al., 2002). Скалярный сейсмический момент определяется по формуле $M_0 = (M_1 - M_3)/2$, где M_1, M_2, M_3 ($M_1 \geq M_2 \geq M_3$) — главные значения тензора сейсмического момента.

Результаты расчетов тензора сейсмического момента для двух моделей главного толчка ЗУП приведены в табл. 2. Глубина эквивалентного точечного источника в обоих вариантах равна $h = 25$ км, длительность разрыва $\tau = 20$ с, а различие в оценках скалярного момента: $M_0 = 1.09 \cdot 10^{20}$ Н·м и $M_0 = 0.99 \cdot 10^{20}$ Н·м незначительно. Расхождения в оценках положения главных осей и нодальных плоскостей для этих моделей практически отсутствуют. Однако значение коэффициента Лодэ-Надаи во второй модели существенно отлично от нуля и равно -39%. В табл. 2 приведены также и решения для

тензора сейсмического момента, полученные GCMT и USGS. Оба последних решения также содержат большое отрицательное значение коэффициента Лодэ-Надаи.

ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ГРУНТА

Сильные движения грунта, вызванные ЗУП, получены по записям сети цифровых акселерометров, расположенных на п-ве Камчатка, о. Беринга и о. Парамушир (Курильские о-ва), с помощью программного пакета, кратко описанного в (Гусев и др., 1989). Инструментальная интенсивность I_a рассчитана по формуле $I_a = 2.5 \cdot \lg(a_{\text{пик}}) + 1.89$ (ГОСТ Р 57546-2017), где $a_{\text{пик}}$ — пиковое ускорение (см/с²) на горизонтальных каналах.

На 35 сейсмических станциях амплитуда записи по ускорению превысила 1 см/с², на восьми из них — 10 см/с² (табл. 3). Наибольшие значения ускорения грунта $a_{\text{пик}} = -41.38$ см/с² были зафиксированы на горизонтальной N-компоненте станции ВКІ, которая расположена на о. Беринг в с. Никольском на расстоянии $\Delta \sim 90$ км от эпицентра ЗУП. Акселерограмма, полученная на станции ВКІ, и спектры записи показаны на рис. 2.

ОБОБЩЕНИЕ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Службой сбора макросейсмической информации КФ ФИЦ ЕГС РАН оперативно был проведен опрос населения в 62 населенных пунктах Камчатского края. Согласно опросу ЗУП ощущалось на расстоянии $\Delta \sim 90$ –500 км от эпицентра с интенсивностью сотрясений от 2 до 5–6 баллов в 36 пунктах сбора макросейсмических данных (рис. 3). Самые сильные проявления, 5–6 баллов, отмечены в ближайшем от эпицентра пункте — с. Никольское ($\Delta \sim 90$ км, о. Беринга). По сообщению из администрации Алеутского района повреждения зданий и сооружений в с. Никольское не зафиксированы. Инструментальная интенсивность по данным сейсмической станции ВКІ составила 6.0 баллов. В Петропавловске-Камчатском ($\Delta \sim 500$ км) ЗУП ощущалось с интенсивностью 3–4 балла. После ЗУП зафиксировано 18 ощутимых афтершоков.

АФТЕРШОКОВЫЙ ПРОЦЕСС

ЗУП сопровождалось большим числом афтершоков (рис. 4). На конец сентября 2019 г. их зарегистрировано ~4 тыс. Афтершоки локализованы преимущественно на глубинах 35–55 км. В ноябре 2018 г. — апреле 2019 г. обработка части

Таблица 1. Основные параметры землетрясения Углового Поднятия 20 декабря 2018 г. в 17^h01^m по данным различных сейсмологических агентств.

Table 1. The main parameters of the Uglovoye Podnyatiye earthquake on December 20, 2018 at 05:01 p.m. according to various seismological agencies

№	Агентство	Время, ч:мин:с	Гипоцентр			Энергетический класс или магнитуда/Кол-во станций
			φ° , с.ш.	λ° , в.д.	h , км	
1	КФ ФИЦ ЕГС РАН	17:01:53	54.91	164.71	54	$KS=16.1/20$ или $ML=7.3/20$ $Mc=7.7/25$ $Mw=7.3-7.4$
2	ФИЦ ЕГС РАН	17:01:54	54.82	164.84	40	$Ms = 7.5/20$, $mb=7.2/21$
3	USGS NEIC	17:01:55	55.10	164.70	16.6	$mb=6.9/742$, $Mww=7.3/155$, $Ms_{20R}=7.3/1079$
4	IDC	17:01:53	55.01	164.60	0	$Ms = 7.2/87$, $mb=6.3/39$
5	IPGP	17:01:54	55.11	164.71	18	$Mw=7.3$
6	GCMT	17:02:03	54.94	164.75	17.6	$Mw=7.2$

Примечание.

1. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов КФ ФИЦ ЕГС РАН. — URL: <http://emsd.ru/sdis/info/earthquakes/catalogue.php>
 2. Каталог землетрясений Службы Срочных Донесений ФИЦ ЕГС РАН. = URL: <http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/new/equakes.pl>
 3. USGS National Earthquake Information Centre. = URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000ivfw/executive>
 4. Bulletin of the International Seismological Centre. = URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
 5. Catalogs of earthquakes provided by GEOSCOPE. = URL: <http://geoscope.ipgp.fr/index.php/en/catalog/236-catalog-of-earthquakes-in-2018>
 6. Global CMT catalog. = URL: <http://www.globalcmt.org/>
- Энергетические характеристики: K_s — энергетический класс по S -волне по энергетической классификации (Федотов, 1972); ML — локальная магнитуда; Mc — магнитуда по коде; Mw — моментная магнитуда; M_s — магнитуда по поверхностной волне Релея; M_{s_20R} — региональная магнитуда по поперечным и поверхностным волнам вблизи периода $T=20$ с; mb — магнитуда по объемным волнам.

Note.

1. The catalog of earthquakes of Kamchatka and the Komandorski Islands of the KB FRC UGS RAS. — URL: <http://emsd.ru/sdis/info/earthquakes/catalogue.php>
 2. The catalog of earthquakes of the Express Report Service of the Federal Information Center of the Federal State Statistics Service of RAS. — URL: <http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/new/equakes.pl>
 3. USGS National Earthquake Information Center. — URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000ivfw/executive>
 4. Bulletin of the International Seismological Center. — URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
 5. Catalogs of earthquakes provided by GEOSCOPE. — URL: <http://geoscope.ipgp.fr/index.php/en/catalog/236-catalog-of-earthquakes-in-2018>
 6. Global CMT catalog. — URL: <http://www.globalcmt.org/>
- Energy characteristics: K_s — energy class by the S -wave according to the energy classification (Fedotov, 1972); ML — local magnitude; Mc — magnitude by code; Mw — moment magnitude; M_s — the magnitude of the Rayleigh surface wave; M_{s_20R} — regional magnitude by transverse and surface waves near the period $T = 20$ s; mb — magnitude by body waves.

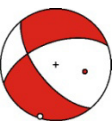
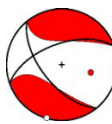
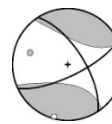
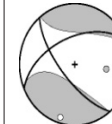
афтершоков велась в отложенном режиме из-за большого числа событий.

Текущая оценка представительности камчатского каталога землетрясений для области афтершоков (для района с координатами $\varphi=54.1-55.6^\circ$ с.ш., $\lambda=163.6-165.45^\circ$ в.д.) составила $MLC=3.45$ при статистической значимости $\alpha=0.3$ (рис. 5). Соответствующий представительный каталог афтершоков содержит более 900 землетрясений. Подавляющее число представительных афтершоков (~75%) произошло в течение первого месяца после ЗУП (~60% — в первые 7 суток после основного события). По состоянию

на конец сентября 2019 г. афтершоковый процесс ЗУП еще не закончился.

В облаке афтершоков отчетливо выделяются три пространственных кластера эпицентров, вытянутые в субмеридиональном направлении (рис. 6а, табл. 4). Параметры эллипсов рассчитаны по данным за первый месяц после ЗУП, используя представительную часть каталога. Каждый эллипс включает 90% выделенных событий данного кластера. Все наиболее сильные землетрясения афтершоковой последовательности ($ML \geq 5.5$) произошли внутри этих областей, очерченных эллипсами (рис. 6б).

Таблица 2. Параметры механизмов очага землетрясения 20.12.2018 г. по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН, GCMT и USGS NEIC
Table 2. Parameters of the mechanisms of the earthquake source on December 20, 2018 according to the data of the KB FRC UGS RAS, GCMT and USGS NEIC

№	Агент-ство модель *	Время, чч:мм:сс.с	Диаграмма механизма очага	Главные оси тензора												Механизм						M_w	h	τ	η
				Ось Т			Ось N			Ось Р			Механизм												
													NP I			NP II									
				M_1	pl	azm	M_2	pl	azm	M_3	pl	azm	stk	dip	$slip$	stk	dip	$slip$							
				(°)	(°)	(°)		(°)		(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)			км	с	%					
1	КФ ФИЦ ЕГС РАН DC	17:01:53.9		$1.09 \cdot 10^{20}$	4	287	0	45	21	$-1.09 \cdot 10^{20}$	45	193	340	56	-147	231	63	-38	7.3	25	20	0			
2	КФ ФИЦ ЕГС РАН NT	17:01:53.9		$1.11 \cdot 10^{20}$	1	286	$-0.26 \cdot 10^{20}$	45	17	$-0.85 \cdot 10^{20}$	45	195	340	59	-145	231	61	-36	7.3	25	20	-39			
3	GCMT, NT	17:02:03.2		$1.06 \cdot 10^{20}$	4	285	$-0.36 \cdot 10^{20}$	61	189	$-0.70 \cdot 10^{20}$	29	17	155	73	-156	58	68	-19	7.2	18	20	-61			
4	USGS, W-phase NT	17:01:55.0		$1.13 \cdot 10^{20}$	10	287	$-0.32 \cdot 10^{20}$	46	28	$-0.81 \cdot 10^{20}$	42	187	336	53	-154	230	70	-40	7.3	20	24	-49			

Примечания. * Модель — оптимальный двойной диполь (DC) для № 1 и наилучший двойной диполь (NT) в остальных случаях. M_1, M_2, M_3 ($M_1 \geq M_2 \geq M_3$) — главные значения тензора сейсмического момента; M_0 — скалярный сейсмический момент; h — глубина; τ — длительность разрыва; η — коэффициент Лоденада: $\eta = (2M_2 - M_1 - M_3)/(M_1 - M_3)$. Диаграммы построены в равноплощадной проекции нижней полусферы.

Notes. * The model is the optimal double couple (DC) for No. 1 and the best double couple (NT) in other cases. M_1, M_2, M_3 ($M_1 \geq M_2 \geq M_3$) — the eigen values of the seismic moment tensor; M_0 — the scalar seismic moment; h — the depth; τ — duration of the rupture; η — the Lode-Nadai coefficient: $\eta = (2M_2 - M_1 - M_3)/(M_1 - M_3)$. The diagrams are built in an equal area projection of the lower hemisphere.

Таблица 3. Пиковые значения ускорения и скорости грунта для станций, записавших ЗУП с амплитудой по ускорению $a_{\text{пик}} \geq 10 \text{ см/с}^2$.

Table 3. Peak values of acceleration and soil velocity for stations that recorded the UPE with an acceleration amplitude of $a_{\text{peak}} \geq 10 \text{ см/с}^2$.

	Название сейсми- ческой станции	Код с/ст *	Δ , км	r , км	Амплитуда $a_{\text{пик}}$, см/с ²			Скорость $v_{\text{пик}}$, см/с			I_a
					Компонента			Компонента			
					E	N	Z	E	N	Z	
1	Беринг	BKI	87	102	-36.81	-41.38	-30.02	-1.763	-2.114	-1.180	5.9
2	Жупаново	GPN	319	323	-14.36	-12.84	5.81	0.789	-0.780	0.320	4.8
3	Крутоберегово	KBG	196	203	21.84	16.27	11.96	-1.212	1.209	-0.683	5.2
4	Мишенная	MSN	448	451	-13.53	23.21	-5.99	1.043	1.937	-0.404	5.3
5	Администрация_УК	UK1	201	208	-16.87	-13.05	7.28	-1.174	-0.921	-0.443	5.0
6	Водозабор	UK2	196	204	-17.62	-14.21	-4.55	-0.891	0.728	-0.357	5.0
7	Автодор	UK4	202	209	-33.36	-34.55	9.85	1.630	1.908	0.605	5.7
8	Усть-Камчатск_Дельта	UK5	200	207	33.84	-29.56	-8.03	-1.321	1.253	-0.359	5.7

Примечание. Δ — эпицентральный расстояние, r — гипоцентральный расстояние; $a_{\text{пик}}$ — максимальная амплитуда пикового ускорения на каналах HN; $v_{\text{пик}}$ — максимальная амплитуда пиковой скорости (значения пиковых скоростей получены путем интегрирования записей ускорений); I_a — инструментальная интенсивность сотрясений.

Note. Δ — the epicentral distance, r — the hypocentric distance; a_{peak} is the maximum amplitude of peak acceleration on the HN channels; v_{peak} — maximum amplitude of the peak velocity (values of peak velocities are obtained by integrating acceleration records); I_a — the instrumental intensity of tremors.

Крупнейший кластер I располагается в окрестности эпицентра главного толчка ЗУП и вытянут в север-северо-восточном направлении. Он занимает центральную часть и северо-восточный склон Углового поднятия, пересекает Алеутский желоб и достигает подножья Командорского блока.

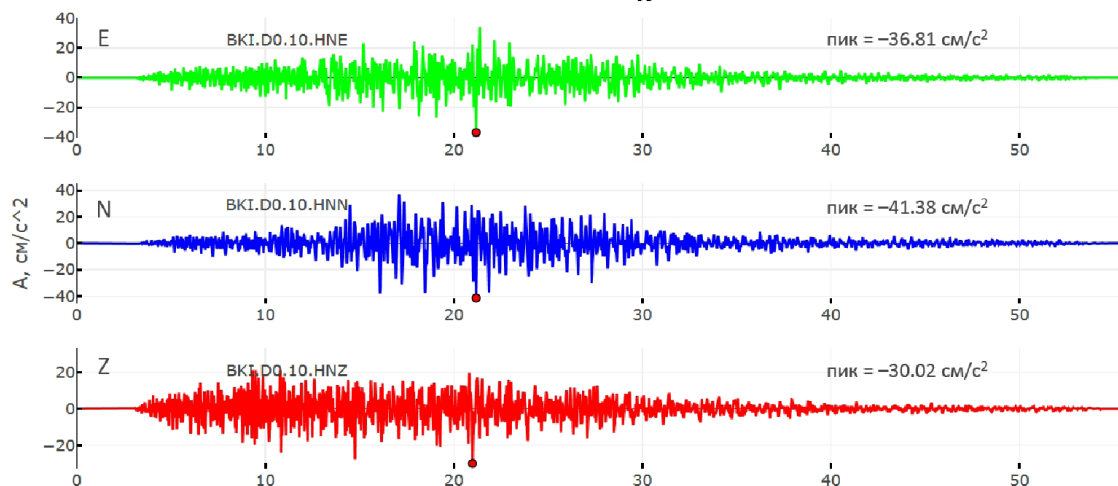
Кластер II образован событиями, происходившими в окрестности сильнейшего (и значительно превосходящего остальные) афтершока 24.12.2018 г., $ML=6.6$. Первые проявления активности кластера II зафиксированы до этого землетрясения, но основное число событий последовало после него. Кластер II протягивается из Алеутского желоба на север-северо-восток на склоны Командорского блока. При этом северная часть кластера образована слабыми афтершоками.

Наименее активный кластер III располагался на внешнем океаническом склоне Камчатского желоба, приблизительно занимая область между двумя афтершоками с $ML>5$, произошедшими в первые дни после ЗУП (рис. 6). Кластер III находится на простирации большой оси эллипса главного кластера I, однако пространственно отделен от последнего и отличается от него по простирации.

Форма кумулятивного графика временного хода афтершоков в трех кластерах различна и

соответствует традиционному представлению о плавном затухании афтершокового процесса только в I кластере (рис. 7a).

В первые сутки после ЗУП афтершоки происходили в основном в кластере I (>350 событий). За это время в кластерах II и III зафиксировано менее 10 толчков в каждом. Примерно через 25 часов после ЗУП в кластере II произошла первая заметная активизация (9 событий в течение 1.6 часа), которая началась с землетрясения с $ML=5.75$. В это же время возросла частота событий в кластере III. Окончательно кластеры II и III оформились почти одновременно в конце четвертых суток после ЗУП. Именно в это время с разницей всего в два часа произошли сильнейшие для каждого из них землетрясения: 24.12.2018 г. 12:41 $ML=6.6$ (кластер II) и 24.12.2018 г. 10:41 $ML=5.3$ (кластер III) (рис. 7б), сопровождавшиеся десятками афтершоков. Синхронность активизаций в кластерах II и III, прилегающих с разных сторон к главному кластеру I, но разнесенных между собой на ~50 км, не имеет объяснения, но подчеркивает единство процесса, происходившего во всех частях очага ЗУП. К сентябрю 2019 г. афтершоковый процесс в кластерах I и II еще продолжался, в отличие от кластера III, где он в основном завершился к апрелю 2019 г.

a***б***

Время, сек

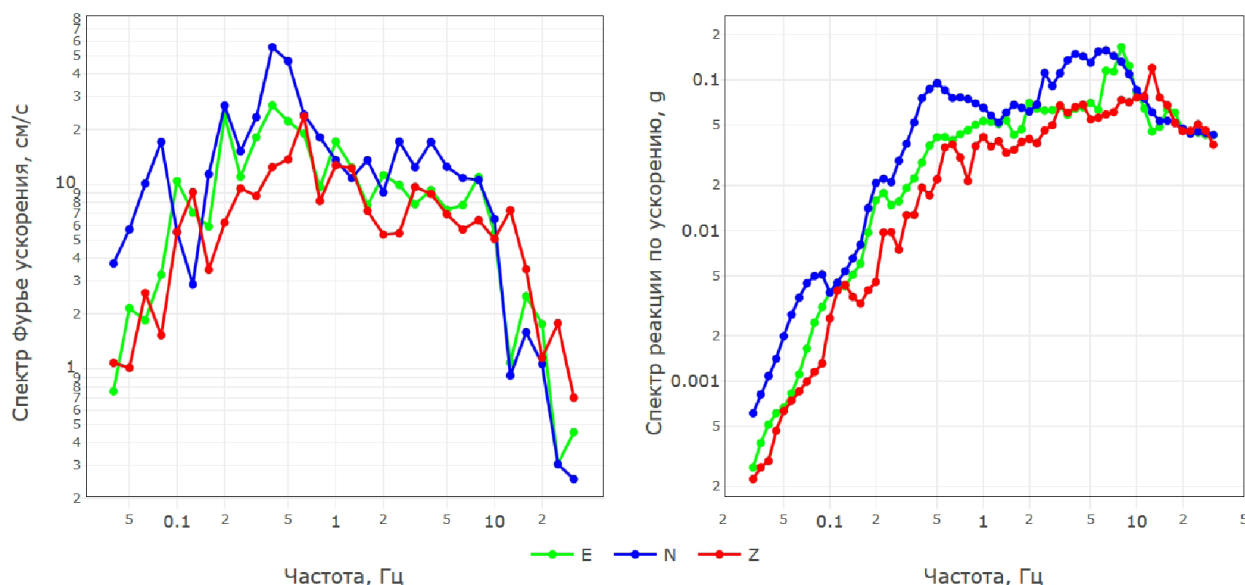
в

Рис. 2. Трехкомпонентные записи и спектры ускорения ЗУП на ближайшей к очагу сейсмической станции «Беринг» (ВКИ), $\Delta \sim 90$ км: *a* — акселерограмма; *б* — спектры Фурье ускорения; *в* — спектры реакции по ускорению для 5% затухания. Сейсмические каналы: восток-запад (E), север-юг (N), вертикальный (Z). Пиковые значения для каждой записи выделены точкой.

Fig. 2. Three-component recordings and acceleration spectra of the UPE at the Bering (ВКИ) seismic station closest to the source, $\Delta \sim 90$ km: *a* — accelerogram; *б* — Fourier spectra of acceleration; *в* — acceleration reaction spectra for 5% attenuation. Seismic channels: east-west (E), north-south (N), vertical (Z). Peak values for each record are highlighted with a dot.

Выделившаяся сейсмическая энергия в зонах I и II определяется сильнейшими событиями — суммарная энергия остальных на их фоне незначительна: 0.6% для зоны I и 3% для зоны II. Лишь в зоне III вклад в сейсмическую энергию сильнейшего афтершока и остальных землетрясений сопоставим (табл. 4). В пределах кластера I сильнейшими афтершоками являются землетрясения 20.12.2018 г. 17:19 и 22.12.2018 г. 13:29 с одинаковыми магнитудами $M_L=6.0$. Для них разрыв по магнитуде с главным толчком составляет $\Delta M=1.3$, что соответствует закону

Бота (Bath, 1965). Этого нельзя сказать про всю афтершоковую последовательность ЗУП (по трем кластерам). Как следует из графика повторяемости, для нее главный толчок 20.12.2018 г. $M_L=7.3$ превышает по магнитуде сильнейший афтершок 24.12.2018 г. $M_L=6.6$ только на $\Delta M=0.7$.

УДАЛЕННАЯ ПО ВРЕМЕНИ ФОРШОКОВАЯ АКТИВНОСТЬ

В конце 2016 г. в течение ~ 1 месяца в Алеутском желобе в 20 км север-северо-восточнее

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ УГЛОВОГО ПОДНЯТИЯ

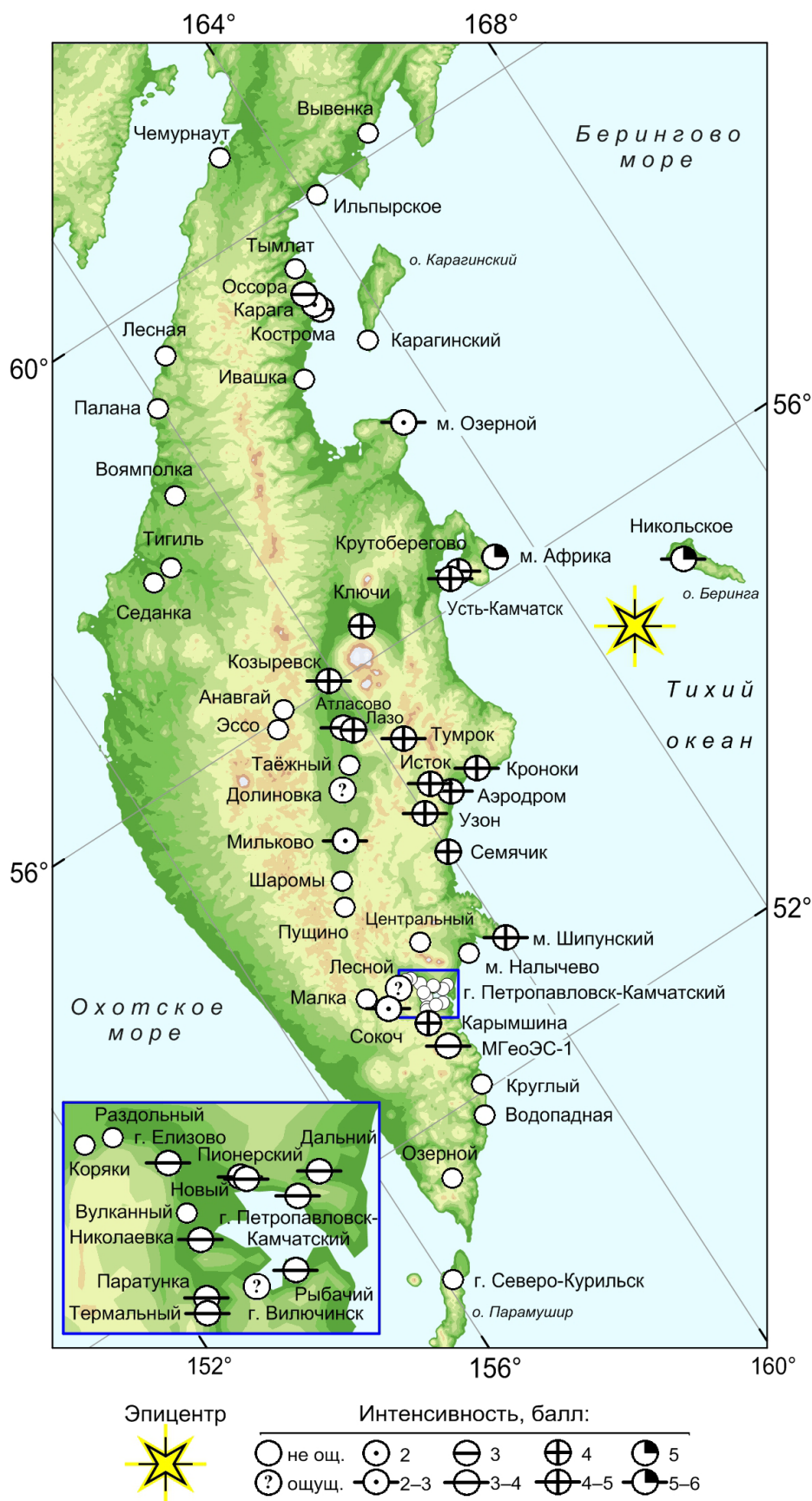


Рис. 3. Карта макросейсмического проявления ЗУП в пунктах сбора макросейсмической информации на территории Камчатского края по результатам опроса местного населения.

Fig. 3. A map of the macroseismic effects of the UPE in the collection points of macroseismic information in the Kamchatka Region according to the polling of the local population.

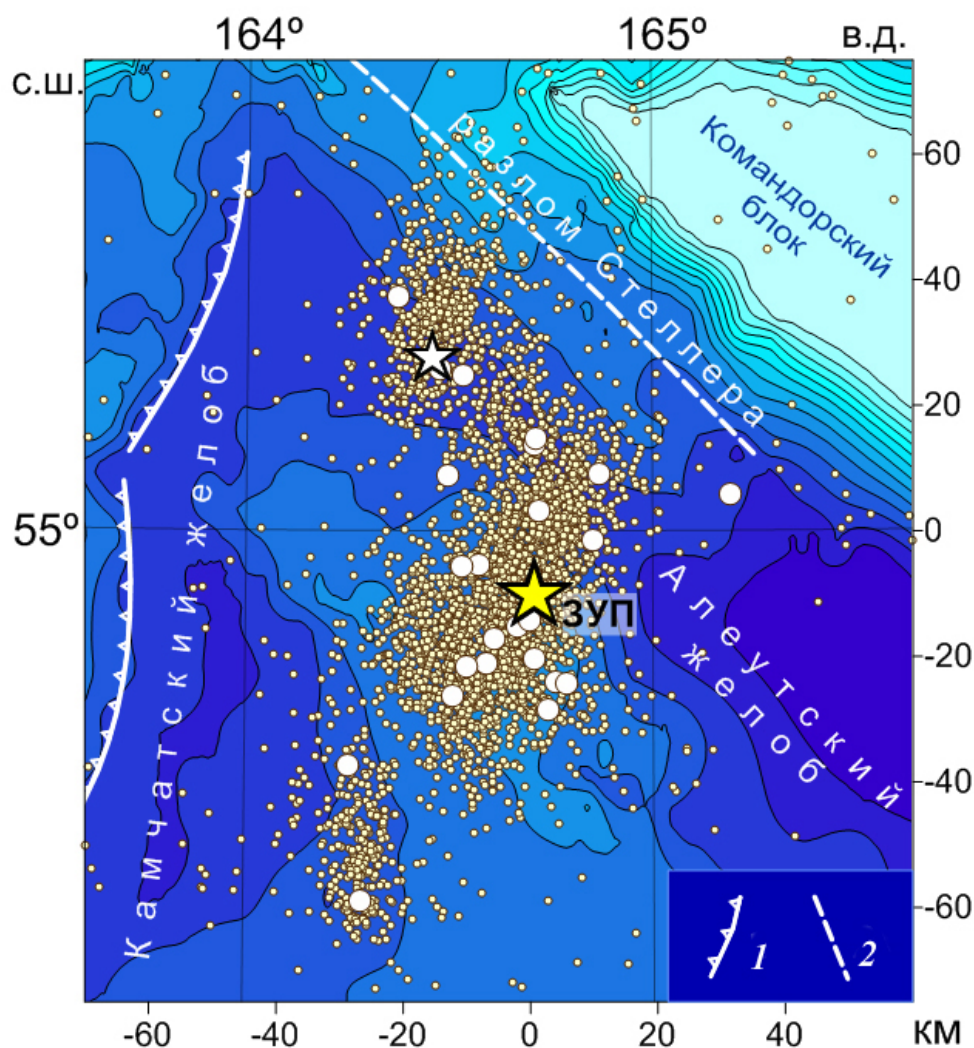


Рис. 4. Облако афтершоков ЗУП за период с 20 декабря 2018 г. по 31 мая 2019 г. Звезды — эпицентры главного толчка и сильнейшего афтершока 24 декабря 2018 г. Большими белыми кружками обозначены землетрясения с магнитудами $ML \geq 5.0$. Разломы: 1 — Камчатская зона субдукции, 2 — субвертикальный сдвиг на склоне Командорского блока.

Fig. 4. A cloud of the UPE aftershocks over the period December 20, 2018 to May 31, 2019. Stars denote the epicenters of the main shock and the strongest aftershock on December 24, 2018. Earthquakes with magnitudes $ML \geq 5.0$ are indicated by large white circles. Faults: 1 — Kamchatka subduction zone, 2 — subvertical strike-slip on the slope of the Komandorsky block.

будущего эпицентра ЗУП наблюдалось значительное возрастание сейсмической активности (рис. 8а). За это время на участке радиусом менее 5 км в диапазоне глубин 30–50 км зафиксировано 5 землетрясений с магнитудами $ML = 5.1–5.9$ ($M_w = 4.9–5.5$), а в прилегающей области — еще ~160 более слабых событий. Облако всех этих событий, вытянутое на ~30 км, располагается в основном в пределах очаговой области, которую через два года покрыли афтершоки ЗУП. Более того, оно протянулось вдоль главной оси афтершокового кластера I, связанного с главным толчком ЗУП. Эпицентры наиболее сильных толчков сконцентрированы в южной, наиболее приближенной к эпицентру ЗУП части сейсмогенного объема. Глубина большинства этих событий 30–50 км.

Механизмы пяти сильнейших из рассматриваемых землетрясений конца 2016 г. (рис. 8б) демонстрируют те же закономерности, что и механизм ЗУП: Их средняя ось напряжения растяжения Т ориентирована субширотно, субгоризонтально (рис. 8в, $A_z = 289 \pm 7^\circ$), как и у ЗУП (табл. 2, $A_z = 285–287^\circ$).

Сходство пространственных и кинематических параметров с аналогичными для ЗУП и относительная близость во времени позволяет предположить, что события конца 2016 г. (рис. 8а) являлись его форшоками, и рассматривать их как начало сейсмического процесса в очаге будущего ЗУП.

Однако сходные землетрясения происходили в этом районе и раньше, например, в марте 1978 г.

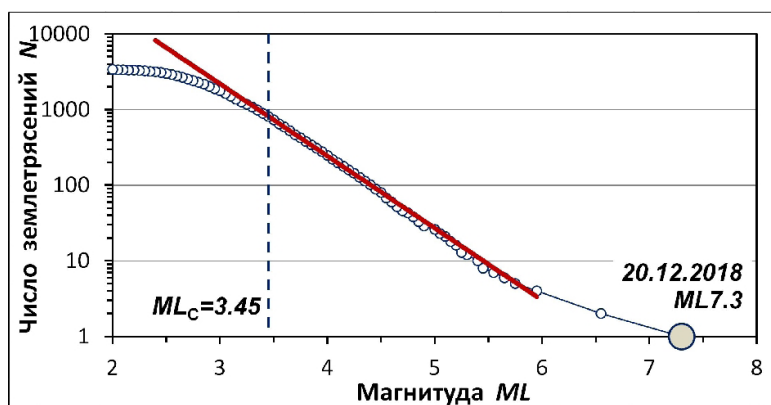


Рис. 5. Кумулятивный график повторяемости афтершоков ЗУП. Вертикальная линия отмечает уровень представительности $ML_c=3.45$.

Fig. 5. The cumulative recurrence graph of the UPE aftershocks. The vertical line indicates the level of representativeness $ML_c = 3.45$.

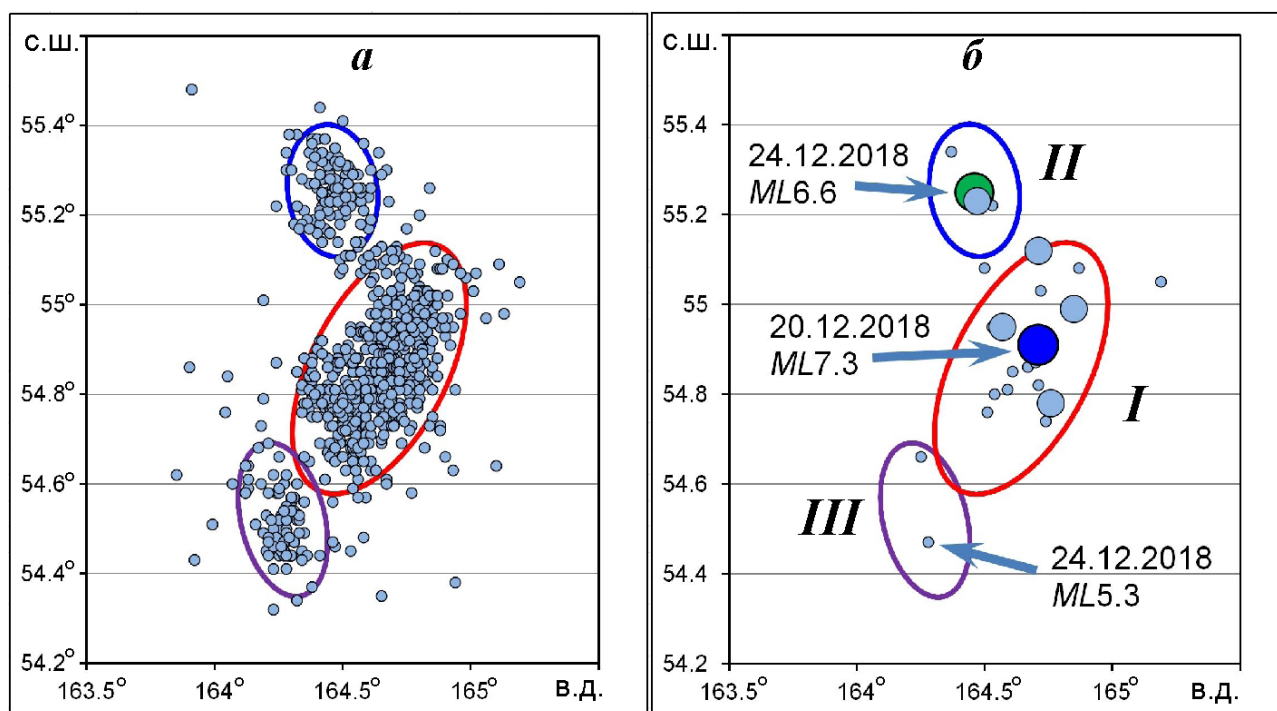


Рис. 6. Положение афтершоков ЗУП с 20.12.2018 г. до 01.05.2019 г. Эллипсы (I–III), оконтуривающие три изолированных кластера, построены по афтершокам первого месяца и включают 90% событий соответствующей окрестности: *a* — афтершоки представительного уровня магнитуды $ML \geq 3.5$; *б* — афтершоки с $ML \geq 5.3$. Отмечены наиболее сильные землетрясения в кластерах.

Fig. 6. The UPE aftershocks from December 20, 2018 to May 1, 2019. The ellipses (I–III) that outline the three isolated clusters are constructed from the aftershocks of the first month and include 90% of the events in the corresponding neighborhood: *a* — aftershocks of a representative level of magnitude $ML \geq 3.5$; *б* — aftershocks with $ML \geq 5.3$. The strongest earthquakes in the clusters are marked.

Поэтому сейсмические события 2016 г. могут рассматриваться как эпизод единого систематически повторяющегося процесса деформаций северо-западного участка Тихоокеанской плиты, находящегося в условиях постоянного субширотного растяжения.

КОСЕЙСМИЧЕСКИЕ СМЕЩЕНИЯ: НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Косейсмические смещения, вызванные ЗУП, зафиксированы на о. Беринга ($\Delta \sim 90$ км, станция BRNG) и в пос. Усть-Камчатск на восточном побе-

режье Камчатки ($\Delta \sim 200$ км, станция UKAM) (рис. 9, табл. 5). По данным Камчатской региональной сети постоянных ГНСС наблюдений на станции BRNG смещение достигло ~ 25 мм в восточном направлении. Станция UKAM сместилась на ~ 5 мм на север-северо-запад. На остальных ГНСС станциях, расположенных на п-ве Камчатка, косейсмический эффект ЗУП надежно выявлен не был. Обратим внимание, что косейсмическое смещение на о. Беринга (рис. 10) противоположно направлению подвижки, вызванной Ближне-Алеутским землетрясением 17.07.2017 г. с $M_w = 7.8$ (Чебров и др., 2019).

Таблица 4. Параметры выделенных кластеров афтершоков.

Table 4. Parameters of selected aftershock clusters.

Зона	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>
Большая ось a , км	68	33	39
Меньшая ось b , км	34	22	21
Азимут большей оси α_a , °	27	172 (352)	166 (346)
Координаты центра эллипса (широта, ° с.ш.; долгота, ° в.д.)	54.86 164.64	55.25 164.46	54.52 164.27
Сильнейшее землетрясение в зоне (дата, время, магнитуда)	20.12.2018 17:01 $M_w=7.3$	24.12.2018 12:41 $ML=6.6$	24.12.2018 10:41 $ML=5.3$
Сейсмическая энергия сильнейшего землетрясения в зоне E_{EQ} , Дж	$1.3 \cdot 10^{16}$	$4.0 \cdot 10^{14}$	$1.3 \cdot 10^{12}$
Суммарная сейсмическая энергия остальных землетрясений в зоне E_{Σ} , Дж	$7.3 \cdot 10^{13}$	$1.2 \cdot 10^{13}$	$1.1 \cdot 10^{12}$
Доля от общего числа представительных афтершоков, %	75	14	11

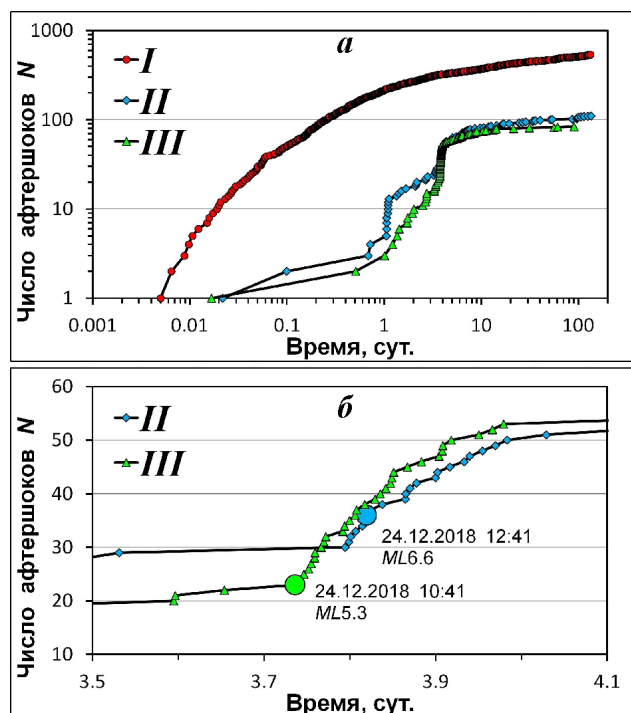


Рис. 7. Развитие афтершокового процесса во времени: *a* — кумулятивный график числа афтершоков в выделенных эллиптических зонах. Время отсчитывается от ЗУП; *б* — синхронная активизация II и III зон 24.12.2018 г., представленная в более крупном масштабе. Отмечены землетрясения наибольшей магнитуды в каждой из этих зон.

Fig. 7. The development of the aftershock process in time: *a* — cumulative graph of the number of aftershocks in the selected elliptical zones. Time is counted from the UPE; *б* — synchronous activation of II and III zones on December 24, 2018, presented on a larger scale. Earthquakes of the greatest magnitude in each of these zones are marked.

Полученных данных о косейсмических смещениях недостаточно для самостоятельного изучения очага ЗУП. Однако они могут быть использованы для проверки построенных выше оценок очаговых параметров. С этой целью проведены расчеты косейсмических смещений на основе простой параметрической модели протяженного источника.

Рассчитаны горизонтальные смещения дневной поверхности для модели плоской прямоугольной сдвиговой дислокации в однородном упругом изотропном полупространстве (Okada, 1985). Подвижка предполагается постоянной на всей поверхности разрыва. Ее направление, как и параметры залегания плоскости разрыва, фиксированы представленным выше механизмом

землетрясения (табл. 2, №1, тип тензора DC). Зафиксирована также оцененная выше глубина центраида $h = 25$ км. При расчете скалярного момента землетрясения использованы значения параметров среды: плотности $\rho = 2.92$ г/см³ и скорости поперечных волн $\beta = 3.85$ км/с, согласно (Kennett et al., 1995) для глубины $h = 25$ км. Свободные (варьируемые) параметры модели: φ , λ — широта и долгота центраида (глубина фиксирована); L , W — длина и ширина прямоугольной площадки разрыва; D — величина очаговой подвижки. Расчеты проводились для обеих нодальных плоскостей механизма.

Результаты расчетов продемонстрировали, что удовлетворительного соответствия данным станций ГНСС удается достигнуть в широком диапазоне свободных параметров. В частности, данные могут быть приближены при выборе любой из возможных нодальных плоскостей. На рис. 9 и в табл. 5 приведен пример расчета полей горизонтальных смещений дневной поверхности от модельного очага ЗУП. Представлен результат для модели, которая обеспечивает наилучшее приближение измеренных направлений горизонтальных смещений станций BRNG

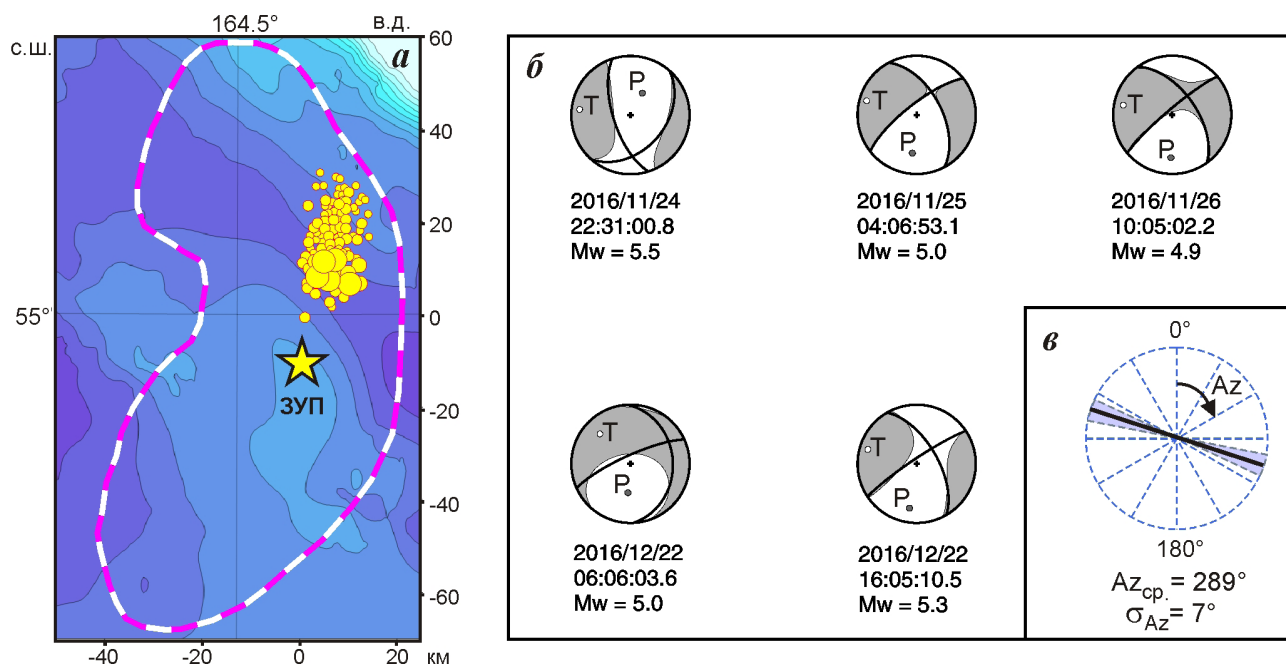


Рис. 8. Удаленные во времени форшоки ЗУП: 24 ноября – 27 декабря 2016 г.: *a* — скопление эпицентров форшоков (кружки) в будущей афтершоковой зоне ЗУП (окирчурена); *б* — диаграммы тензоров сейсмического момента для пяти наиболее сильных форшоков (решения GCMT); *в* — среднее значение азимута оси напряжения растяжения T для приведенных механизмов очага форшоков.

Fig. 8. Remote in time UPE foreshocks: November 24 – December 27, 2016: *a* — cluster of epicenters of foreshocks (circles) in the future aftershock zone of the UPE (contoured); *б* — tensors diagrams for the five most powerful foreshocks (GCMT solutions); *в* — the average azimuth of the axis of the tensile stress T for the represented foreshocks.

и UKAM. При этом и амплитуды расчетных смещений удовлетворяют результатам измерений. Параметры модели: $\varphi = 54.9^\circ$ с.ш., $\lambda = 164.42^\circ$ в.д., $L = 60$ км, $W = 25$ км, $h = 25$ км, $D = 2.1$ м. Верхняя кромка площадки разрыва (рис. 9) соответствует глубине 14 км. Отметим, что длина площадки разрыва близка к протяженности главного I кластера афтершоков. Скалярный сейсмический момент для данной модели $M_0 = 1.58 \cdot 10^{20}$ Н·м. Моментная магнитуда $M_w = 7.4$, найденная по косейсмическим смещениям, лишь на 0.1 превышает M_w , полученную по записям волновых форм (табл. 2). Как видим, результаты моделирования косейсмических подвижек подтверждают оценки параметров очага ЗУП, полученные по широкополосным сейсмограммам.

ПРЕДВЕСТНИКОВЫЕ ЭФФЕКТЫ

В ходе своего развития очаг ЗУП вызвал аномалии в параметрах геофизических полей и сейсмичности на значительной площади. По данным Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) перед ЗУП выявлены предвестники в параметрах высокочастотного сейсмического шума, вариациях активности радона, геоакустической эмиссии, отношении скоростей

сейсмических волн V_p/V_s и наклона графика повторяемости γ . Пять прогнозов были признаны успешными (табл. 6). Предвестниковое сейсмическое затишье по параметру RTL было обнаружено в режиме реального времени, а по параметру «Z-функция» — ретроспективно. Отметим, что выявленное сейсмическое затишье предвещало обсуждавшуюся выше форшоковую активизацию конца 2016 г.

Таким образом, процесс подготовки ЗУП, проявившийся в параметрах сейсмичности (табл. 6, № 4–7), длился не менее трех лет. Учитывая, что геофизические наблюдения, по которым выявлены предвестники (табл. 6, № 1–3), сконцентрированы на Петропавловском геодинамическом полигоне ($\Delta \sim 450$ –500 км), дальное действие развивающегося очага ЗУП можно оценить в ~ 500 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Землетрясение Углового Поднятия (ЗУП) с магнитудой $M_w = 7.3$ –7.4 произошло 20 декабря 2018 г. в Тихоокеанской литосферной плите вблизи зоны сочленения Курило-Камчатского и Алеутского глубоководных желобов. Гипоцентр землетрясения и его афтершоковое облако по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН располагались в диапазоне глубин 35–55 км под акваторией Тихого океана.

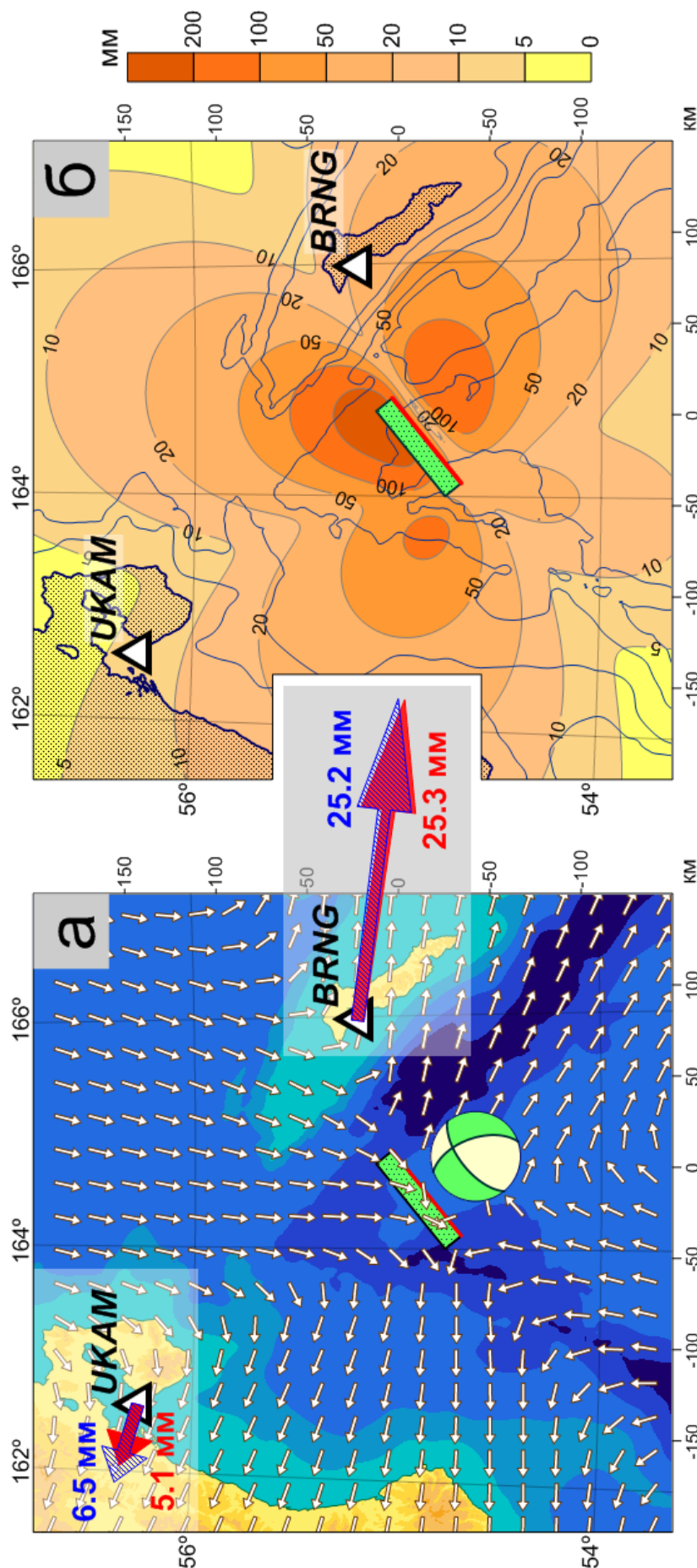


Рис. 9. Пример модельного поля горизонтальных косейсмических смещений: *a* — направления смещений (внемасштабные белые стрелки) и векторы косейсмических смещений станций BRNG и UKAM: зарегистрированные — красные и смодельные — синие (приведены вне общего масштаба, но с сохранением относительных величин); *б* — изолинии амплитуд смещений. Прямоугольником изображена проекция модельного очага на дневную поверхность, красной линией выделена его верхняя кромка. Диаграмма механизма очага, использованного в данной модели, соответствует № 1 в табл. 2.

Fig. 9. An example of a model field of horizontal coseismic displacements: *a* — displacement directions (off-scale white arrows) and coseismic displacement vectors of BRNG and UKAM stations: red — registered and blue — model (shown off the general scale, but with relative values); *б* — displacement amplitude isolines. The rectangle denotes the projection of the model rupture on the day surface, its top edge is highlighted by a red line. Model corresponds to № 1 in Table 2.

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ УГЛОВОГО ПОДНЯТИЯ

Таблица 5. Зарегистрированные косейсмические смещения по ГНСС наблюдениям и результаты их моделирования.

Table 5. Registered coseismic displacements according to GNSS observations and the results of their modeling.

Пункт ГНСС	Долгота, ° в.д.	Широта, ° с.ш.	Смещения по наблюдениям, мм			Модельные смещения, мм		
			Е	Н	U	Е	Н	U
BRNG	165.983	55.193	25.1±1.7	-3.5±0.8	0.1±5.8	25.1	-3.0	1.4
UKAM	162.592	56.264	-4.9±0.7	1.4±1.1	-4.3±3.9	-6.3	1.8	-0.3

Таблица 6. Предвестники землетрясения Углового Поднятия 20.12.2018 г. $M_w = 7.3$ по данным КФ РЭС.

Table 6. Precursors of the Uglovoye Podnyatiye earthquake on December 20, 2018, $M_w = 7.3$ according to the Kamchatka Branch of the Russian Expert Council.

№	Исполнитель, организация,	Методика, ссылки	Заключение КФ РЭС
1.	В.А. Салтыков, КФ ФИЦ ЕГС РАН	Мониторинг приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума (Салтыков, 2017)	<i>Успешный прогноз.</i> Заключения о сейсмической обстановке от 19.11.2018 г., 13.12.2018 г.
2.	П.П. Фирстов, КФ ФИЦ ЕГС РАН	Измерение объемной активности радона ^{222}Rn и водорода в почвенном газе (Фирстов, Рудаков, 2003; Фирстов и др., 2006)	<i>Успешный прогноз.</i> Заключения о сейсмической обстановке от 06.12.2018 г., 13.12.2018 г.
3.	В.А. Гаврилов, ИВиС ДВО РАН	Мониторинг вариаций геоакустической эмиссии в глубокой скважине (Гаврилов и др., 2006)	<i>Успешный прогноз.</i> Заключения о сейсмической обстановке от 20.07.2018 г., 07.12.2018 г.
4.	Л.Б. Славина, ИФЗ РАН	Вариации отношения скоростей сейсмических волн V_p/V_s (параметр τ)	<i>Успешный прогноз.</i> Заключения о сейсмической обстановке от 25.10.2018 г., 13.12.2018 г.
5.	В.А. Салтыков, КФ ФИЦ ЕГС РАН	Вариации наклона графика повторяемости γ	<i>Успешный прогноз.</i> Заключение о сейсмической обстановке от 29.01.2016 г.
6.	В.А. Салтыков, КФ ФИЦ ЕГС РАН	RTL -параметр, dS (Салтыков и др., 2013; Соболев и др., 1996)	<i>Предвестник, выявленный в режиме реального времени.</i> Заключение о сейсмической обстановке от 18.11.2016 г. Ошибка по времени
7.	А.А. Коновалова, КФ ФИЦ ЕГС РАН	Z -функция (Салтыков и др., 2013; Wyss, Haberman, 1988)	<i>Предвестник, выявленный ретроспективно</i>

КФ ФИЦ ЕГС РАН — Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский

ИВиС ДВО РАН — Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

ИФЗ РАН — Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

KB FRC UGS RAS — Kamchatka branch of the Federal Research Center of United Geophysical Survey, RAS, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky

IVIS FEB RAS — Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky

IPE RAS — The Schmidt Institute of the Physics of the Earth RAS, Moscow

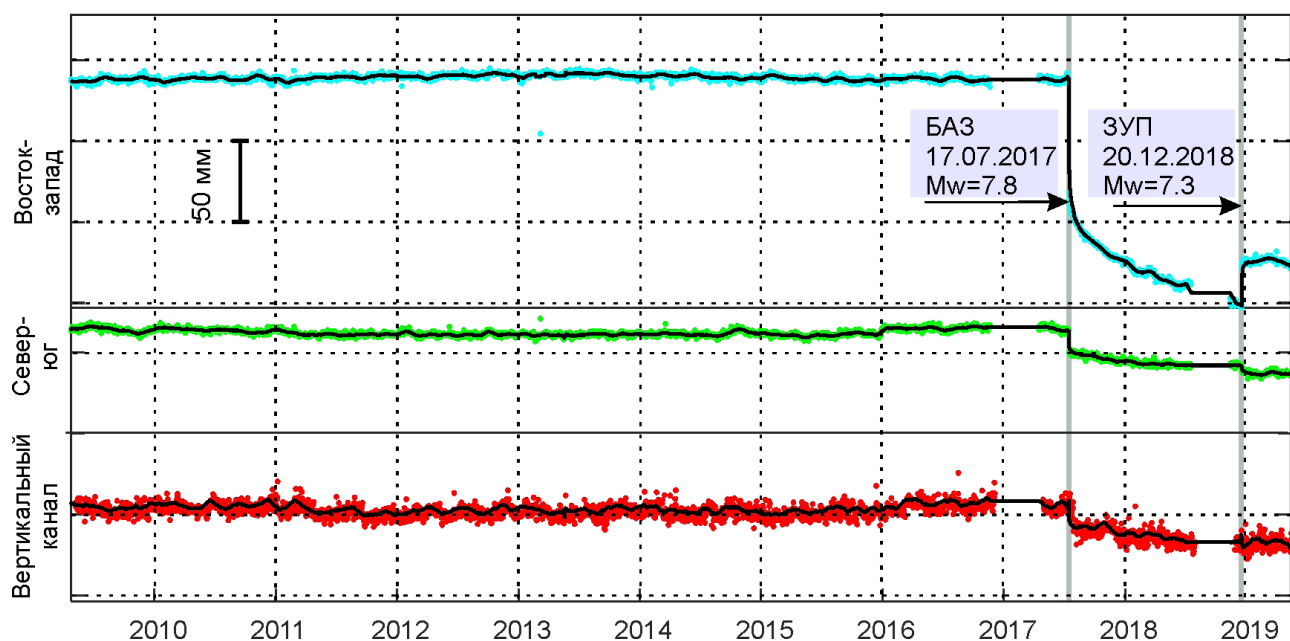


Рис. 10. Временная серия перемещений ГНСС станции BRNG на о. Беринга после устранения линейного и сезонного (годового и полугодового) трендов. Темные волнистые линии — скользящее среднее с окном 30 суток.

Fig. 10. A time series of GNSS displacements of BRNG station on Bering Island without linear and seasonal (annual and semi-annual) trends. Dark wavy lines denote moving average with a 30 days window.

Первичная обработка ЗУП была выполнена в рамках регламентов Службы срочных донесений и Службы предупреждения о цунами РИОЦ «Петропавловск» и составила ~7 минут. Исходя из полученной оценки магнитуды события и его малоглубинного расположения под открытым морем, согласно регламентам была объявлена цунами тревога. Цунами у берегов Камчатского края не наблюдалось, однако слабая волна высотой в несколько миллиметров была зафиксирована в Тихом океане системой глубинных мореографов.

ЗУП ощущалось на расстояниях до 500 км, но благодаря удаленности от большинства населенных пунктов, не привело к разрушительным последствиям. Согласно опросу населения, максимальная балльность составила $I=5-6$ на эпицентральной расстоянии $\Delta \sim 90$ км на о. Беринга в с. Никольское. Там же отмечено максимальное инструментально зарегистрированное акселерометром ускорение ~ 60 см/сек².

Перед ЗУП (в режиме близком к реальному времени и ретроспективно) были выделены предвестниковые аномалии в параметрах геофизических полей и сейсмичности. По данным Камчатского филиала РЭС пять прогнозов были признаны успешными. Выявленные предвестниковые эффекты позволяют оценить дальное действие развивающегося очага ЗУП в ~ 500 км, при этом длительность его подготовки составила не менее трех лет. Примерно за два года

до ЗУП, в конце 2016 г., в районе его будущего очага в течение месяца наблюдалась форшоковая активность с магнитудой сильнейшего события $ML=5.85$. Как и ЗУП, сильнейшие форшоки были обусловлены напряжением растяжения, направленным субгоризонтально, субширотно ($Az \sim 276-279^\circ$). Началом сейсмического процесса в очаге ЗУП можно считать ноябрь 2016 г.

ЗУП вызвало интенсивную афтершоковую активность. По состоянию на конец сентября 2019 г. зарегистрировано ~ 4000 афтершоков. Большинство из них было обработано в отложенном режиме из-за высокой интенсивности афтершокового процесса на его начальной стадии. Сильнейший афтершок имел магнитуду $ML=6.6$, еще 25 событий соответствовало магнитудам $ML \geq 5.0$. Облако афтершоков первых четырех дней было вытянуто субмеридионально вдоль простирания трещины растяжения, соответствующей механизму очага ЗУП. Общая площадь афтершоковой области составила ~ 5 тыс. км². Особенностью афтершокового процесса является ярко выраженная пространственная кластеризация сейсмических событий — выделены три кластера афтершоков. Форма кумулятивного временного хода землетрясений в трех кластерах различна: только в главном (включающем окрестности эпицентра ЗУП) кластере она соответствует традиционному представлению о плавном затухании афтершокового процесса. В двух побочных кластерах наблюдались синхронные процессы активизации.

По записям широкополосных сейсмических станций Дальнего Востока определены тензор сейсмического момента ЗУП (табл. 2), глубина эквивалентного источника 25 км, длительность очагового процесса 20 с и моментная магнитуда $M_w=7.3$. Тензор сейсмического момента ЗУП обладает большой недипольной составляющей и может интерпретироваться как трещина растяжения. Полученные по волновым формам оценки параметров очага ЗУП подтверждены моделированием косейсмических подвижек, зафиксированных на ближайших к эпицентру ГНСС станциях BRNG ($\Delta \sim 90$ км) и UKAM ($\Delta \sim 200$ км).

ЗУП и серия его афтершоков являются одним из закономерных эпизодов в сейсмическом процессе в окрестности сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг, где возможны сильные землетрясения с магнитудами до ~ 9 , которые могут вызвать катастрофические цунами. Во второй части статьи будет рассмотрена предвещающая сейсмичность в районе очаговой зоны и механизмы очага сильнейших афтершоков ЗУП в связи с особенностями тектонической позиции землетрясения.

Работа выполнена в рамках Госзадания ФИЦ ЕГС РАН (темы НИР № 0152-2018-006, № 0152-2019-0001), госзадания ИТПЗ РАН АААА-А19-119011490129-0 и при частичной поддержке научного проекта РФФИ (грант 17-05-00185).

Список литературы [References]

- Гаврилов В.А., Власов Ю.А., Денисенко В.П. и др. Опыт комплексных скважинных геофизических наблюдений в целях мониторинга состояния геосреды // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 44–53 [Gavrilov V.A., Vlasov Yu.A., Denisenko V.P. et al. Experience in integrated borehole geophysical observations to monitor the state of the geological environment // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2006. № 2(8). P. 44–53 (in Russian)].
- Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В. Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 52–67 [Gavrilov V.A., Morozova Yu.V., Storcheus A.V. Variations in the Level of Geoaoustic Emission in Deep Well G-1, Kamchatka and Their Relation to Seismicity // Vulkanologiya i sejsmologiya. 2006. № 1. P. 52–67 (in Russian)].
- Гнибиденко Г.С., Быкова Т.Г., Веселов О.В. и др. Тектоника Курило-Камчатского глубоководного желоба. М.: Наука, 1980. 179 с. [Gnibidenko G.S., Bykova T.G., Veselov O.V. et al. // Tectonics of the Kuril-Kamchatka deep-sea trench, M.: Nauka, 1980. 179 p. (in Russian)].
- ГОСТ Р 57546–2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. М.: Стандартинформ, 2017 [GOST R 57546–2017. Earthquakes. Seismic intensity scale. M.: Standartinform, 2017 (in Russian)].
- Гусева Е.М., Гусев А.А., Оскорбин Л.С. Пакет программ для цифровой обработки сейсмических записей и его опробование на материале некоторых записей сильных движений // Вулканология и сейсмология. 1989. № 1. С. 35–49 [Guseva E.M., Gusev A.A., Oskorbin L.S. A program package for digital processing of seismic records and its application to some sample records of strong ground motion // Journal of Volcanology and Seismology. 1991. V. 11. № 5. P. 648–670].
- Дрознин Д.В., Чебров Д.В., Дрознина С.Я. и др. Автоматизированная оценка интенсивности сейсмических сотрясений по инструментальным данным в режиме квазиреального времени и ее использование в рамках службы срочных сейсмических донесений на Камчатке // Сейсмические приборы. 2017. № 3. С. 5–19. <https://doi.org/10.21455/si2017.3-1> [Droznin D.V., Chebrov D.V., Droznina S.Ya. et al. Automated Estimation of Seismic Shaking Intensity from Instrumental Data in Quasi-Real-time Mode and Its Use in the Operation of the of Seismic Early Warning Service in the Kamchatka Region // Seismic Instruments. 2018. V. 54. Iss. 3. P. 239–246. <https://doi.org/10.3103/S0747923918030088>].
- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализации. М.: Наука, 2006. 254 с. [Zavyalov A.D. Mid-term earthquake forecast: fundamentals, methodology, implementation. M.: Nauka, 2006. 254 p. (in Russian)].
- Землетрясения России в 2016 году / Гл. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. 212 с. [The earthquakes of Russia in 2016 / Ed. A.A. Malovichko. Obninsk: GS RAS, 2018. 212 p.].
- 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. Вып. 20. С. 149–158 [Pavlov V.M., Abubakirov I.R. Algorithm for Calculation of Seismic Moment Tensor of Strong Earthquakes Using Regional Broadband Seismograms of Body Waves // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2012. № 2(20). P. 149–158 (in Russian)].
- Павлов В.М., Абубакиров И.Р. Расчет тензора сейсмического момента слабых камчатских землетрясений: первые результаты // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды шестой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 138–142 [Pavlov V.M., Abubakirov I.R. Calculation of seismic moment tensor for weak Kamchatka earthquakes: first results // Problems of complex geophysical monitoring of Far East of Russia. Proceedings of VI science conference. PetropavlovskKamchatsky. September, 1–7. 2017. Obninsk: GS RAS, 2017. P. 138–142 (in Russian)].
- Салтыков В.А. О возможных проблемах оценки пространственно-временных особенностей представительности каталога землетрясений (на примере Камчатского каталога Единой геофизической службы РАН) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. Вып. 43. № 3. С. 25–35 [Saltykov V.A. On possible problems of assessing the spatio-temporal features of the completeness of the earthquake catalog

- (on the example of the Kamchatka catalog of the Geophysical Service of RAS) // *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2019. № 3(43). P. 25–35 (in Russian)].
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Коновалова А.А.* Параметрическое представление динамики сейсмичности Камчатки // *Вулкано-логия и сейсмология*. 2013. № 1. С. 65–84 [Saltykov V.A., Kugaenko Yu.A., Kravchenko N.M., Konovalova A.A. Parametric Representation of Kamchatka Seismicity over Time. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2013. V. 7. № 1. P. 58–75. <https://doi.org/10.1134%2FS0742046313010065>].
- Славина Л.Б., Мячкин В.В., Белянкин Г.А.* Закономерности проявления во времени и пространстве кинематических предвестников землетрясений // *Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясений*. 1993. № 1. С. 131–138 [Slavina L.B., Myachkin V.V., Belyankin G.A. Patterns of manifestation in time and space of kinematic precursors of earthquakes // *Construction of models for the development of the seismic process and precursors of earthquakes*. 1993. № 1. P. 131–138 (in Russian)].
- Славина Л.Б., Мячкин В.В., Левина В.И.* Опыт применения кинематических предвестников сейсмического поля для прогнозов землетрясений на Камчатке // *Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор*, 2004. С. 216–227 [Slavina L.B., Myachkin V.V., Levina V.I. The experience of using kinematic precursors of the seismic field for earthquake forecasts in Kamchatka // *Integrated seismological and geophysical studies of Kamchatka. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatskij pechatnyj dvor*, 2004. P. 216–227 (in Russian)].
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С., Смирнов В.Б., Завьялов А.Д.* Способ среднесрочного прогноза землетрясений // *ДАН*. 1996. Т. 347. № 3. С. 405–407 [Sobolev G.A., Tyupkin Yu.S., Smirnov V.B., Zavialov A.D. The method of medium-term earthquake forecast // *Doklady Earth Sciences*. 1996. V. 347. № 3. P. 405–407].
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с. [Fedotov S.A. Energy classification of the Kuril-Kamchatka earthquakes and the problem of magnitudes. M.: Nauka, 1972. 117 p. (in Russian)].
- Фирстов П.П., Рудаков В.П.* Результаты регистрации подпочвенного радона в 1997–2000 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // *Вулкано-логия и сейсмология*. 2003. № 1. С. 26–41 [Firstov P.P., Rudakov V.P. The results of the registration of subsoil radon in 1997–2000 at the Petropavlovsk-Kamchatka geodynamic test site // *Volcanology i seismology*. 2003. № 1. P. 26–41 (in Russian)].
- Фирстов П.П., Широков В.А., Руленко О.П. и др.* О связи динамики подпочвенного радона (^{222}Rn) и водорода с сейсмической активностью Камчатки в июле-августе 2004 г. // *Вулкано-логия и сейсмология*. 2006. № 5. С. 49–59 [Firstov P.P., Shirokov V.A., Rulenko O.P. et al. On the relationship between the dynamics of subsoil radon (^{222}Rn) and hydrogen with the seismic activity of Kamchatka in July-August 2004 // *Volcanology i Seismology*. 2006. № 5. P. 49–59 (in Russian)].
- Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // *Вулкано-логия и сейсмология*. 2013. № 1. С. 18–40 [Chebrov, V.N., Droznin D.V., Kugaenko Yu.A. et al. The system of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011 // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2013. V. 7. № 1. P. 16–36. <https://doi.org/10.1134/S0742046313010028>].
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др.* Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 Г. с $M_w=7.8$. I. Протяженный разрыв вдоль Командорского блока Алеутской островной дуги по данным наблюдений на Камчатке // *Физика Земли*. 2019. № 4. С. 48–71. <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019448-71> [Chebrov D.V., Kugaenko Yu.A., Lander A.V. et al. Near Islands Aleutian Earthquake with $M_w=7.8$ on July 17, 2017: I. Extended Rupture along the Commander Block of the Aleutian Island Arc from Observations in Kamchatka // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019. V. 55. № 4. P. 576–599. <https://doi.org/10.1134/S1069351319040037>].
- Bath M.* Lateral inhomogeneities of the upper mantle // *Tectonophysics*. 1965. V. 2. № 6. P. 483–514.
- Ekstrom G., Nettles 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. 200–20. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>.
- Henry C., Woodhouse J.H., Das S.* Stability of earthquake moment tensor inversion: effect of the double-couple constraint // *Tectonophysics*. 2002. V. 356. Iss. 1. P. 115–124. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00379-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00379-7).
- Kennett B., Engdahl E.R., Buland R.* Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes // *Geophysical Journal International*, 1995. V. 122. P. 108–124.
- Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *BSSA*. 1985. V. 75. № 4. P. 1135–1154.
- Wyss M., Habermann R.E.* Seismic quiescence precursory to a past and a future Kurile island earthquake // *Pure and Applied Geophysics*. 1979. V. 117. Iss. 6. P. 1195–1211. <https://doi.org/10.1007/bf00876215>.

**THE UGLOVOYE PODNYATIYE EARTHQUAKE
ON DECEMBER 20, 2018 ($M_w = 7.3$) IN THE JUNCTION ZONE
BETWEEN KAMCHATKA AND ALEUTIAN OCEANIC TRENCHES**

**D.V. Chebrov¹, Yu.A. Kugaenko¹, A.V. Lander², I.R. Abubakirov¹, S.Ya. Droznina¹,
S.V. Mityushkina¹, V.M. Pavlov¹, V.A. Saltykov¹, Yu.K. Serafimova¹, N.N. Titkov¹**

¹*Kamchatka Branch of Geophysical Survey of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006*

²*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS, Moscow, Russia, 117485*

The paper presents the first results of integrated research of the strong seismic event (Uglovoye Podnyatiye earthquake (UPE) with a magnitude of $M_w=7.3$) that occurred on December 20, 2018 in the junction zone between the Kuril-Kamchatka and Aleutian island arcs. The authors has provided macroseismic information about the UPE, calculated peak ground accelerations and the seismic moment tensor, and described briefly the forshock and aftershock processes, as well as summarized data on earthquake precursors. UPE was reported to be felt at distances of up to 500 km. The maximum shaking was recorded as $I = 5-6$ at an epicentral distance of $\Delta \sim 90$ km on Bering Island, where the maximum instrumental acceleration of ~ 60 cm/s² was recorded. It is shown that foreshocks remote in time occurred 2 years prior to the UPE. The distinctive grouping of the aftershocks in three spatially isolated clusters characterized by different parameters of the seismicity time course is related to the long and intense aftershock process of the UPE. The strongest aftershock had magnitude $ML=6.6$, another 25 events corresponded to $ML \geq 5.0$. UPE was preceded by precursor anomalies in the parameters of geophysical fields and the seismic process. The authors estimated the size of the UPE rupture, the depth of the equivalent source, the magnitude of the focal slip, and the duration of the rupture. The seismic moment tensor UPE has a large non-dipole component.

Keywords: earthquake, aftershock, foreshock, precursor, earthquake mechanism, tsunami, Kamchatka.