УДК 550.34

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ УГЛОВОГО ПОДНЯТИЯ И УСЛОВИЯ ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ ТИХООКЕАНСКОЙ ПЛИТЫ

Чебров Д.В.[1], Ландер А.В.[2], Кугаенко Ю.А.[1], Абубакиров И.Р.[1], Дрознина С.Я.[1], Митюшкина С.В.[1], Павлов В.М.[1], Салтыков В.А.[1], Титков Н.Н.[1], Чеброва А.Ю.[1]

[1] *Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск Камчатский*
[2] *ИТПЗ РАН, г. Москва, land@mitp.ru*

На крайнем северо-западе Тихого Океана, непосредственно южнее области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг, 20 декабря 2018 г. в 17:01 UTC (21.12.2018 г. 05:01 по местному времени) произошло сильное мелкофокусное землетрясение с $M_W = 7.3$. По данным Камчатского филиала (КФ) Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (ФИЦ ЕГС РАН) эпицентр землетрясения располагался в океане в ~450 км к северо-востоку от г. Петропавловска-Камчатского и в ~90 км от ближайшего населенного пункта − села Никольское на о. Беринга (Командорские о-ва). Активная эпицентральная область землетрясения 20.12.2018 г. пересекает небольшое Угловое поднятие, возвышающееся на океанической стороне Камчатского и Алеутского желобов над районом их сочленения (рис. 1). Поэтому рассматриваемое сейсмическое событие было названо землетрясением Углового поднятия (ЗУП).

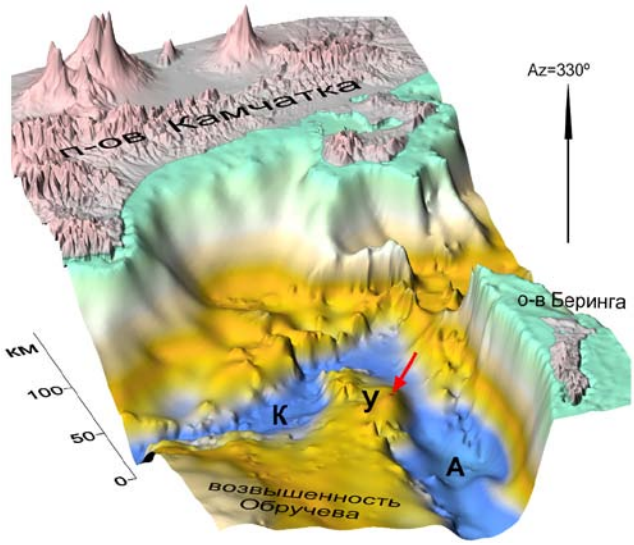

Рис. 1. Географическое положение Углового поднятия. Рельеф в районе сочленения Алеутской дуги с Камчаткой (вид со стороны Тихого океана по азимуту 330°) [10]. У - Угловое поднятие, К - Камчатский желоб, А - Алеутский желоб. Красной стрелкой указан эпицентр ЗУП согласно данным КФ ФИЦ ЕГС РАН. Вертикальный масштаб увеличен в 10 раз.

Землетрясение ощущалось на расстоянии Δ~90 – 500 км от эпицентра с интенсивностью сотрясений от 2 до 5–6 баллов. Разрушений и пострадавших в результате этого события нет. Цунами на побережьях Камчатки и Командорских островов не зафиксировано.

Тектоническая позиция ЗУП и сейсмичность региона

На рис. 2 приведена упрощенная схема мозаики литосферных плит региона, прилегающего к ЗУП, и направления их относительных перемещений. Помимо крупнейшей Тихоокеанской здесь располагаются две относительно больших литосферных плиты: Охотская (включающая Камчатку) и Берингия, а также самостоятельно перемещающиеся блоки Алеутской дуги. Границами Тихоокеанской плиты в этом регионе являются Камчатский и Алеутский желоба. С южной океанической стороны к району соединения желобов подходит северный отрог подводной возвышенности Обручева − Угловое поднятие (рис. 1), вершина которого располагается на глубинах около 4.5 тыс. м [6].

Рис. 2. Схема литосферных плит в северо-западной части Тихого океана. Стрелками на границах показаны направления относительного перемещения плит.

ЗУП является внутриплитным землетрясением. Его очаг располагается почти полностью в пределах Тихоокеанской плиты. Эпицентр основного толчка находится на северо-восточном склоне Углового поднятия. Очаговая область занимает центральную часть поднятия, на юге выходя на склон Камчатского желоба, а на севере спускается в Алеутский

желоб и, косо пересекая его, достигает нижней части склона Командорских островов.

С трех сторон район очага ЗУП окружен активнейшими сейсмогенными границами, на которых возможны землетрясения с магнитудами до ~9 и известны значительные цунамигенные события. Примерно в 60 км западнее эпицентра ЗУП Тихоокеанская плита начинает полого погружаться в Камчатскую зону субдукции с высокой относительной скоростью около 80 мм/год. Это наиболее активная область прилегающего к ЗУП региона. В северной части Камчатской зоны субдукции известны землетрясения с *M* до 8.5. В ~150 км северо-западнее ЗУП располагается сложный тектонический узел, отражающий торцевое столкновение Алеутской дуги с Камчаткой [2]. Здесь зафиксированы взбросовые землетрясения с *M* до 7.5-7.8.

В 30-40 км северо-восточнее ЗУП располагаются активные структуры Алеутской дуги. Ее западная часть состоит из нескольких блоков, перемещающихся вдоль простирания дуги со скоростью, нарастающей по мере приближения к Камчатке [9]. Вероятной причиной такого движения является частичное сцепление блоков Алеутской дуги с обгоняющей их Тихоокеанской плитой. Крайнее в дуге северо-западное положение занимает Командорский блок. Согласно данным ГНСС расположенный на Командорском блоке о-в Беринга сближается с Камчаткой со скоростью 40-50 мм/год [3], составляющей примерно половину от скорости параллельно перемещающейся Тихоокеанской плиты. Поэтому их граница является правосторонними трансформными разломом. Однако существует предположение, что Тихоокеанская плита продолжается под Командорскиий блок, где сохранился реликтовый слэб, погрузившийся под дугу восточнее в зоне Алеутской субдукции, и перемещающийся относительно висячего блока на северо-запад вдоль простирания дуги вместе с основной Тихоокеанской плитой [8].

За период инструментальных наблюдений сейсмическая активность юго-западной границы Командорского блока ниже (максимальная *ML* = 6.3), чем противоположной северо-восточной (*ML* до 7.3, *M*w до 7.8). Особенно мало землетрясений регистрируется юго-восточнее Командорских о-в на участке границы, протянувшемся на ~300 км вдоль Алеутского желоба. Неоднократно высказывалось предположение о существовании здесь запертой Командорской сейсмической бреши, в области которой возможно значительно более сильное землетрясение, магнитуда которого оценивается в 8.1-8.4 [8] или выше [4].

Согласно данным Камчатского регионального каталога [1] район очага ЗУП в течение всего предшествующего периода наблюдений проявлял сейсмическую активность в целом сравнимую с ближайшей юго-западной границей Командорского блока. С 1962 по 2016 гг. в районе Углового поднятия и на прилегающем к нему участке Алеутского желоба зафиксировано более 1700 событий с *ML* > 2 (уровень надежной регистрации *ML*c = 3.75). 13 из них имели *ML* ≥ 5.0.

В конце 2016 г. (с 24 ноября) в течение более месяца в Алеутском желобе в 20 км север-северо-восточнее будущего эпицентра ЗУП наблюдалось значительное возрастание сейсмической активности. За это время на участке радиусом менее 5 км зафиксировано 5 землетрясений с магнитудами *ML* = 5.1-5.85, а в прилегающей области - более 160 более слабых событий. Облако всех этих событий, вытянутое на ~30 км, располагается в основном в пределах очаговой области, которую через 2 года покрыли афтершоки ЗУП. Сходство пространственных и кинематических параметров с аналогичными для ЗУП и относительная близость во времени не исключает возможности, что события 2016 г. отражали начало процесса в очаге будущего ЗУП, то есть являлись его форшоками.

В период до начала очагового процесса ЗУП (до ноября 2016 г.) максимальная активизация в районе Углового поднятия наблюдалась Камчатской сетью в марте 1978 г. В течение месяца здесь было зафиксировано более 120 событий, 7 из которых имели магнитуды *ML* = 5.0-5.85. Сильнейшие землетрясения региона ЗУП за последние 10 лет: Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. с M_W = 6.6 [7], Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с M_W = 7.8 – протяженный разрыв вдоль северо-восточной трансформной границы Командорского блока Алеутской дуги [8], Усть-Камчатское землетрясение 14.11.2018 г. с M_W = 6.2.

Измерения сильных движений грунта и макросейсмическая информация

Сильные движения грунта, вызванные ЗУП, были зарегистрированы сетью цифровых акселерометров, расположенных на п-ве Камчатка, о. Беринга и о. Парамушир. На 35 сейсмических станциях амплитуда записи по ускорению превысила 1 см/с^2, на восьми из них – 10 см/с^2. Наибольшие значения ускорения грунта $a_{пик}$= –41.38 *см/с*^{2} были зафиксированы на горизонтальной N-компоненте станции Беринг (BKI), расположенной в с. Никольском на расстоянии Δ~90 км от эпицентра ЗУП.

Службой сбора макросейсмической информации КФ ФИЦ ЕГС РАН оперативно был проведен опрос населения в 62 населенных пунктах Камчатского края. Согласно опросу ЗУП ощущалось в 36 пунктах сбора макросейсмических данных на расстоянии Δ~90 – 500 км от эпицентра с интенсивностью сотрясений от 2 до 5–6 баллов. Самые сильные проявления, 5–6 баллов, отмечены в ближайшем от эпицентра пункте селе Никольском (Δ~90 км, о. Беринга, Алеутский муниципальный район). По сообщению из администрации района повреждения зданий и сооружений в с. Никольское не зафиксированы. В Петропавловске-Камчатском (Δ~500 км) ЗУП ощущалось с интенсивностью 3–4 балла. После основного толчка отмечено 18 ощутимых афтершоков.

Афтершоковый процесс

ЗУП сопровождалось большим числом афтершоков. На конец мая 2019 г. их зарегистрировано более 3600 (рис. 3). Текущая оценка представительности ML_C = 3.45 в целом для района с координатами φ = 54.1−55.6°*N*, λ = 163.6−165.45°*E* при статистической значимости α = 0.3. Соответствющий представительный каталог афтершоков содержит более 850 землетрясений. К августу 2019 г. афтершоковый процесс еще продолжался.

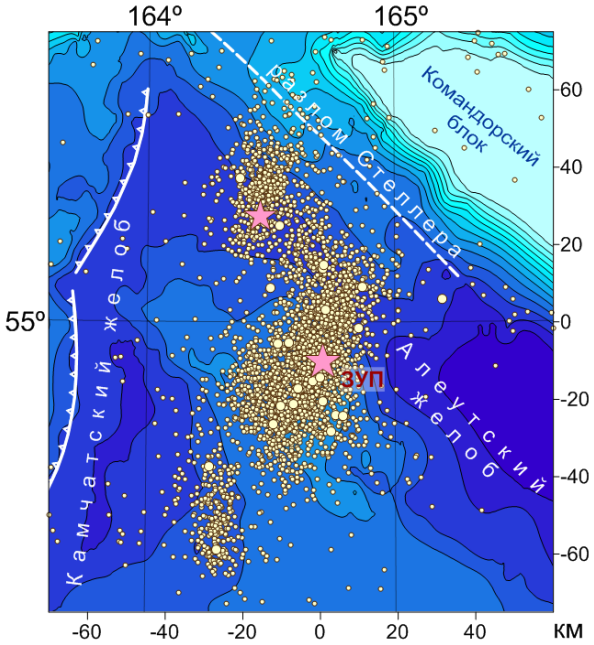

Рис. 3. Облако афтершоков ЗУП за период с 20 декабря 2018 г. по 31 мая 2019 г. Звезды - эпицентры главного толчка и сильнейшего афтершока 24 декабря 2018 г. Светлыми кружками обозначены землетрясения с магнитудами *ML*≥5.0.

В облаке афтершоков отчетливо выделяются три пространственных кластера эпицентров, вытянутые в субмеридиональном направлении. На рис. 4 представлены аппроксимации каждого из них эллипсом. Параметры эллипсов рассчитаны по данным за первый месяц после мэйншока, приняв за нижний порог используемых землетрясений магнитуду представительности каталога ML_C = 3.5. Каждый эллипс включает 90% выделенных событий данного кластера. Все наиболее сильные землетрясения афтершоковой последовательности (*ML* ≥ 5.5), зафиксированные на конец мая 2019 г., находятся внутри этих эллипсов.

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* протягивается из Алеутского желоба на север-северо-восток на склоны Командорского блока и образован событиями, происходившими в окрестности сильнейшего (и значительно превосходящего остальные) афтершока 24.12.2018 г., *ML* = 6.6. Наименее активный кластер *III* располагался на внешнем океаническом склоне Камчатского желоба, приблизительно занимая область между двумя произошедшими в первые дни афтершоками с магнитудами *ML* > 5.

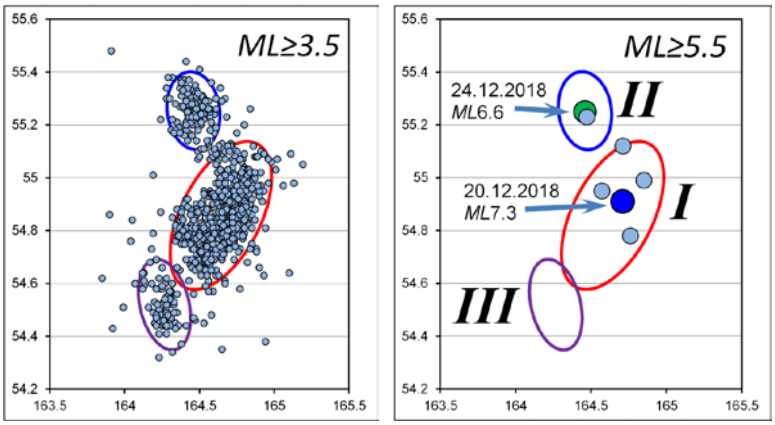

Рис. 4. Эллипсы (*I*–*III*), оконтуривающие кластеры облака афтершоков ЗУП. Справа отмечены наиболее сильные землетрясения в кластерах.

Форма временного хода афтершоков в трех кластерах различна. В первые сутки после ЗУП они 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. Параллельно возросла частота событий в кластере *III*. Окончательно кластеры *II* и *III* оформились почти одновременно в конце 4-х суток после ЗУП. Именно в это время с разницей всего в 2 часа произошли сильнейшие для каждого из них землетрясения: 24.12.2018 г. 12:41 *ML*6.6 (кластер *II*) и 24.12.2018г. 10:41 *ML*5.3 (кластер *III*) (рис. 5), 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 подчеркивает единство процесса, происходившего во всех частях очага ЗУП. К августу 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.

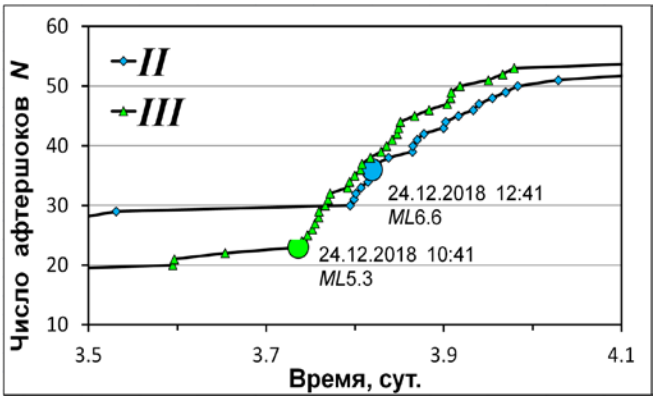

Рис. 5. Синхронная активизация *II* и *III* зон 24.12.2018 г. Кумулятивный график числа афтершоков в выделенных эллиптических зонах. Отмечены землетрясения наибольшей магнитуды в каждой из этих зон.

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.

Тензоры сейсмического момента ЗУП и его сильнейших афтершоков

Построены тензоры сейсмического момента для основного толчка ЗУП и 12 его афтершоков (рис. 6). Определения проведены по записям волновых форм Камчатской региональной сетью широкополосных сейсмических станций. При расчете тензоров использован алгоритм [5]. Для главного толчка оценки глубины эквивалентного точечного источника 25 км, длительности разрыва 20 с, скалярного сейсмического момента ~$1.0*10^{20}$ Нм. Оценка значения коэффициента Лоде-Надаи существенно отлична от нуля и равна -39%. Это означает присутствие в тензоре сейсмического момента главного толчка ЗУП значительной недипольной состовляющей, и может быть проинтерпретировано как наличие в очаге ЗУП значительных деформаций растяжения на субвертикальной поверхности север-северо-восточного простирания.

Построенные тензоры 12 афтершоков относятся к событиям, произошедшим во всех трех кластерах очага ЗУП. Механизмы большинства афтершоков являются сдвигами по крутым плоскостям разрыва. При этом их нодальные плоскости северо-западного простирания располагаются косо (примерно на 20º) по отношению к границе плит. Такое расположение разрывов соответствует типичным синтетическим сколам Риделя, возникающим в условиях высоких тангенцальных правосторонних тектонических напряжений, соответствующих условиям существующим на близкой трансформной границе плит. Общей характеристикой главного толчка и большинства афтершоков является субширотное и субгоризонтальное расположение главной оси растяжения. По-видимому, суммарная деформация группы событий (рис. 7), среди которых преобладали сдвиги, отражает общее состояние субширотного растяжения на данном участке Тихоокеанской плиты.

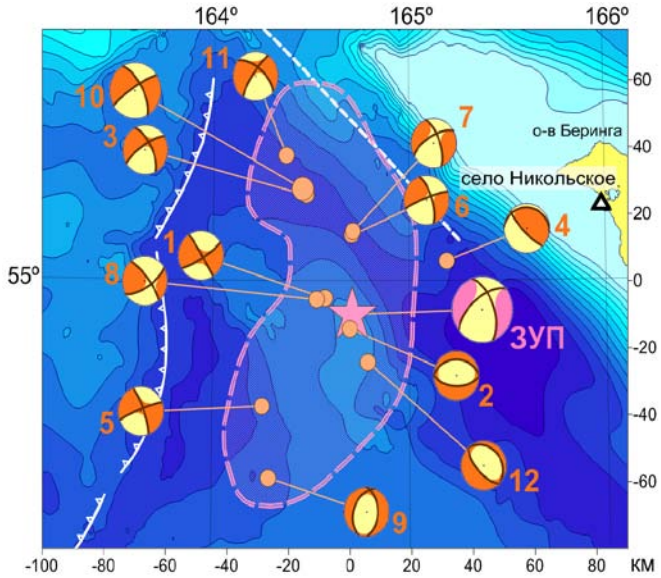

Рис. 6. Диаграммы тензоров сейсмического момента ЗУП и 12 его афтершоков. Розовый контур - облако афтершоков ЗУП.

Косейсмические смещения

По данным Камчатской региональной сети постоянных ГНСС наблюдений косейсмические смещения, вызванные ЗУП, зафиксированы на о. Беринга (Δ ~90 км, станция BRNG) и в пос. Усть-Камчатск на восточном побережье Камчатки (Δ ~200 км, станция UKAM). На станции BRNG смещение достигло ~25 мм в восточном направлении. Станция UKAM сместилась на ~5 мм на северо-запад. В дальнейшем на станции BRNG фиксируется постсейсмическая подвижка, которая за 4 месяца достигла примерно такой же величины.

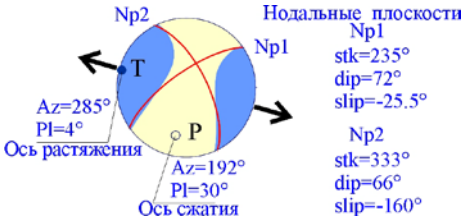

Рис. 7. Диаграмма среднего тензора по главному толчку ЗУП и его 12 афтершокам согласно решениям КФ ФИЦ ЕГС РАН.

Данные ГНСС-станций BRNG и UKAM были использованы для моделирования протяженного источника главного толчка ЗУП и уточнения его размеров и очаговой подвижки. В результате получены следующие оценки: длина очага 45 км, ширина 25 км, очаговая подвижка 3.1 м. Оценка скалярного сейсмического момента $1.51*10^{20}$, найденная по косейсмическим смещениям, примерно в полтора раза превышает оценку, полученную по волновым формам.

Заключение

Землетрясение Углового поднятия (ЗУП) 20 декабря 2018 г., *M*w = 7.3 является сильнейшим внутриплитным событием, принадлежность которого к району южнее зоны сочленения Камчатского и Алеутского желобов надежно установлена. ЗУП ощущалось на расстояниях до 500 км, но благодаря удаленности от большинства населенных пунктов не привело к разрушительным последствиям. Значимые проявления цунами отсутствовали.

Землетрясение сопровождалось большим числом афтершоков. По состоянию на конец мая 2019 г. зарегистрировано более 3600 повторных толчков. Сильнейший из них имел магнитуду *ML*=6.55, еще 25 событий *ML* ≥ 5.0. К августу 2019 г. афтершоковый процесс еще не закончился.

Тензор сейсмического момента основного события ЗУП обладает большой недипольной составляющей и может интерпретироваться как трещина растяжения. Сильнейшие афтершоки отличаются по механизму от главного толчка. Среди них преобладают сдвиги, расположенные косо по отношению к ближайшей трансформной границе плит. Суммарная деформация ЗУП и его сильнейших афтершоков, по-видимому, отражает общее состояние субширотного растяжения на участке Тихоокеанской плиты, прилегающем к зоне сочленения Камчатского и Алеутского желобов.

Список литературы

1. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов КФ ФИЦ ЕГС РАН. URL: http://emsd.ru/sdis/info/earthquakes/catalogue.php.

2. *Кожурин А.И., Пинегина Т.К., Пономарева В.В. и др.* Скорость коллизионных деформаций Камчатского полуострова (Камчатка) // Геотектоника. 2014. № 2. С. 42−60.

3. *Левин В.Е., Гордеев Е.И., Бахтиаров В.Ф., Касахара М.* Предварительные результаты GPS мониторинга на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 3–11.

4. *Лобковский Л.И., Баранов Б.В., Дозорова К.А. и др.* Командорская сейсмическая брешь: прогноз землетрясения и расчет цунами // Океанология. 2014. Т. 54. № 4. С. 561–573.

5. *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.

6. *Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Лурило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Петропавловск-Камчатский: Издательство ЛфмГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с.

7. *Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др.* // Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 Г. с Mw = 6.6, KS = 15.0, I = 6 (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 3. Вып. 35. С. 7−21.

8. *Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др.* // Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с Mw=7.8. I. Протяженный разрыв вдоль Командорского блока Алеутской островной дуги по данным наблюдений на Камчатке // Физика Земли. 2019. № 4. С. 48–71.

9. *Cross R.S., Freymueller J.T.* Evidence for and implications of a Bering plate based on geodetic measurements from the Aleutians and western Alaska // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. No. B07405. doi:10.1029/2007JB005136.

10. The GEBCO_2014 Grid, version 20150318. URL: http://www.gebco.net.