

**ОТРАЖЕНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ
АФТЕРШОКОВОГО ПРОЦЕССА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 20.12.2018, $M_w = 7.3$
В ПОЛЕ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА V_p/V_s**

© 2020 М.С. Кучай¹, Л.Б. Славина¹, Д.В. Чебров²

¹Институт физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта, г. Москва, Россия, 123242; kuchay@ifz.ru

²Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006, danila@emsd.ru

В работе приводятся результаты расчетов, а также дальнейший анализ поля кинематического параметра V_p/V_s в очаговой области сильного землетрясения ($M_w = 7.3$), которое произошло 20 декабря 2018 г. в зоне сочленения Курило-Камчатского и Алеутского глубоководных желобов. Расчеты поля отношения скоростей Р и S волн проводились на основании результатов обработки параметров умеренных и слабых землетрясений ($M_w \leq 6.5$) в очаговой зоне землетрясения и в ее окрестностях, зарегистрированных системой сейсмических наблюдений Камчатского филиала ФИЦ «Единая Геофизическая Служба РАН» в период с 2009 г. по 15.06.2019 г. Таким образом, изучался наиболее интенсивный период длительного афтершокового процесса. Результаты анализа поля V_p/V_s и его сравнение с механизмами очагов сильных событий в окрестностях очаговой области изучаемого землетрясения приводят нас к выводу, о том, что кинематический параметр V_p/V_s характеризует упругие и прочностные особенности геофизической среды, а также отражает характер и изменения поля напряжений. Кроме того, в работе обсуждается предположение о влиянии особенностей деформационного режима на вид и форму распределения параметра V_p/V_s . Это может иметь особую важность для развития методик прогноза землетрясений и диагностики состояния среды.

Ключевые слова: Камчатка, землетрясение Углового Поднятия, сейсмичность, афтершоки, параметр V_p/V_s .

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмическая активность, в том числе на уровне слабых региональных землетрясений, несет информацию об активизации того или иного участка исследуемых фокальных зон. Слежение за временами пробега Р- и S-волн, регистрируемых на станциях, и отношением скоростей этих волн — параметром V_p/V_s , дает информацию о динамике и состоянии геологической среды и отражает ее пространственно-временные изменения. Этот параметр может быть выражен через коэффициенты Ламе. Таким образом, поле параметра несет в себе информацию о физическом состоянии среды, ее напряженно-деформированном состоянии.

В настоящей работе представлены результаты исследования поля параметра V_p/V_s в ходе афтершокового процесса сильного землетрясения 20 декабря 2018 г. ($M_w = 7.3$, $K_s = 16.1$). Это земле-

трясение произошло в области сочленения двух островодужных систем — Курило-Камчатской и Алеутской, и, по-видимому, представляет собой составную часть процесса мощной активизации западной окраины Алеутской дуги, который начался в 2017 г. (Чебров и др., 2017, 2019; Saltykov et al., 2017). По географическому признаку этому событию было присвоено название землетрясение Углового Поднятия (Чебров и др., 2020), (рис. 1). Расчеты поля скорости проводились на основании результатов обработки параметров умеренных и слабых землетрясений ($M_w \leq 6.5$), зарегистрированных системой сейсмических наблюдений Камчатского филиала Федерального Исследовательского Центра Единой Геофизической Службы РАН (КФ ФИЦ ЕГС РАН) (Чебров и др., 2013) в очаговой зоне землетрясения и в прилегающих районах в период с 2009 г. по 16 июня 2019 г. В обработку были вовлечены данные большинства сейсмических станций

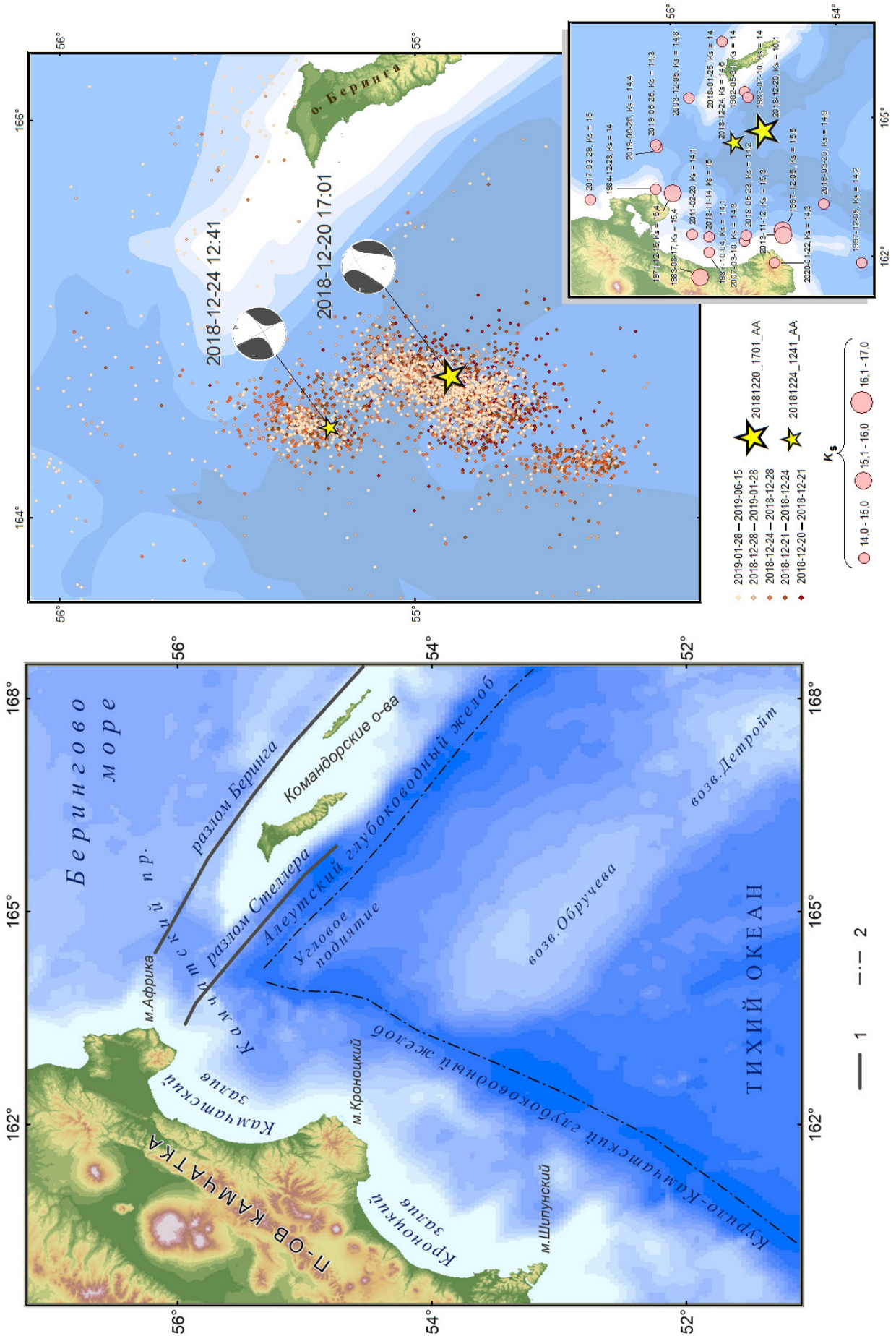


Рис 1. Структурная схема района исследований (слева) и сейсмичность афтершоковой зоны землетрясения Углового Поднятия и ближайших районов в период с 20.12.2018 г. по 15.06.2019 г. (справа). Выделены эпицентры основного толчка, и сильнейшего афтершока (24.12.2018, $M_w = 6.1$, $K_S = 14.6$), показаны их механизмы по данным NEIC (<https://earthquake.usgs.gov>). На врезке — эпицентры сильных землетрясений района за период инструментальных наблюдений (1962 г. — по наст. вр.), по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН, энергетическая классификация — в энергетических классах K_S . 1 — разломы; 2 — оси глубоководных желобов.

Fig. 1. Scheme of investigated region (left) and seismicity of aftershock area of Corner Rise Earthquake and of near field from 20.12.2018 till 15.06.2019 (right). Epicenters of the mainshock and the strongest aftershock are highlighted as stars. Also, their focal mechanisms (NEIC data) are displayed. In the box: epicenters of strongest earthquake of region of instrumental epoch (KB GS RAS data, 1962 — present time), energy class K_S is used as magnitude scale. 1 — faults; 2 — axis of oceanic trenches.

камчатской сейсмической сети, а также пункты наблюдений вблизи Северо-Курильска, которые относятся к системе наблюдений Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН (Фокина и др., 2019).

Методика расчета параметра V_p/V_s разработана и подробно описана в работе (Славина, Мячкин, 2005). Напомним кратко ее основные моменты в приложении к настоящей работе.

Единичные значения параметра рассчитываются аналитически по формуле:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{T_{S-P}}{T_p - T_0} + 1,$$

где T_{S-P} — разность времен вступления Р- и S-волн на конкретной станции от i -ого землетрясения, T_0 — время в очаге, T_p — время вступления Р-волны, соответственно $T_p - T_0$ — время пробега Р-волны. Затем для каждого события рассчитывались осредненные по группе станций значения параметра V_p/V_s . Полученное значение приписывается положению гипоцентра. Таким образом, можно изучать пространственно-временное распределение указанного параметра и делать заключения о ее напряженно-деформированном состоянии. В работе строились карты пространственно-временного распределения афтершоков, вертикальные разрезы в плоскости XZ.

Как известно, отношение скоростей Р и S волн, может быть выражено через упругие параметры среды — параметры Ламе. В линейной теории упругости закон Гука выражает линейную зависимость между тензором деформации ϵ и тензором напряжений σ в упругой среде:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\epsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\epsilon_{ij}.$$

Здесь λ называется первым параметром Ламе, а μ — вторым параметром Ламе, который соответствует модулю сдвига, δ_{ij} — символ Кронекера.

Когда упругие параметры μ , λ равны, тогда

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}} = \sqrt{3} \approx 1.73.$$

Это считается хорошим приближением для геологической среды и эмпирически данное соотношение хорошо выполняется во всем мире.

Таким образом, отличия значения V_p/V_s от 1.73 свидетельствуют об аномальном состоянии среды.

Приведенные соотношения, связывающие упругие параметры, однозначно свидетельствуют о прямой связи параметра V_p/V_s с полем напряжения в сейсмоактивном регионе. При дилатансионном процессе растяжения, «растрескивании» среды отношение V_p/V_s уменьшается. При сжатии (закрывание трещин) увеличивается отношение V_p/V_s . При этом именно смыкание берегов трещин с проскальзыванием, а не просто «исчезновение» трещин может обеспечить отношение скоростей, превышающее значение

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}}$$

для тела без трещин. (Гарагаш, 1983; Гарагаш, Хайдаров, 1989; Николаевский, 1996)

Значения, равные 1.73 ± 0.05 , считаются нормальными для исследуемой геологической среды, значения $V_p/V_s < 1.68$ — пониженными, характеризующими процесс растяжения. Значения $V_p/V_s > 1.78$ рассматриваются как повышенные, характеризующие процесс сжатия. Эти границы установлены исходя из представлений В.Н. Николаевского (1996), и стали традиционными в исследованиях поля параметра V_p/V_s (Славина, Мячкин, 2005).

КРАТКОЕ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 20.12.2018

В пределах региона исследования (рис. 1) находится крайний северо-западный участок Тихоокеанской плиты, ограниченный с севера и северо-запада сочленяющимися глубоководными желобами Курило-Камчатским и Алеутским (Гордеев и др., 2015). К зоне сочленения желобов прилегает своим северным окончанием одна из крупнейших морфоструктур Тихого океана — Гавайско-Императорский хребет. На акваториях Камчатско-Командорского региона расположены два крайних звена этого хребта — возвышенность Детройт

и возвышенность Обручева (в некоторых работах возвышенностью Обручева называют оба эти звена). В отличие от более южных участков Гавайско-Императорского хребта, выстраивающихся в субмеридиональном направлении по 170° в.д., возвышенности Детройт и Обручева надстраивают хребет с отклонением к западу, что особенно заметно для возвышенности Обручева, вытянутой примерно на 250 км в СЗ направлении и прилегающей своим СЗ окончанием к Курило-Камчатскому глубоководному желобу напротив подводного продолжения Кроноцкого п-ова.

На участке Тихоокеанской плиты, прилегающем к западному окончанию Алеутского глубоководного желоба, отсутствуют морфологические признаки краевого океанического вала. Переход к океаническому борту желоба фиксируется разрозненной цепочкой небольших поднятий, наиболее крупные из которых расположены на флангах рассматриваемого участка, например, Угловое поднятие, расположенное непосредственно в зоне сочленения желобов (Селиверстов, 1998, 2009), где и был локализован эпицентр землетрясения 20 декабря 2018 г., которое исследуется в настоящей статье. По месту локализации эпицентра основного толчка данное землетрясение получило название «землетрясение Углового поднятия».

Рассмотрим акустический разрез, иллюстрирующий строение рассматриваемого участка Тихоокеанской плиты, где произошло исследуемое землетрясение и его афтершоки (рис. 2).

Приведенный разрез непрерывного сейсмического профилирования пересекает эпицентральную область землетрясения 20 декабря 2018 г, а также область, затронутую афтершоковым процессом. На разрезе можно видеть сложно построенный в сеймотектоническом плане участок Тихоокеанской плиты, осложненный структурами Углового поднятия (по Н.И. Селиверстову (2009)), и переход в район Алеутского желоба, осложненный разломом Стеллера и воздымающимся Командорским блоком Алеутского хребта.

Рассмотренные особенности подводного рельефа в зоне сочленения структур западного окончания Алеутской островной дуги с континентальным склоном Восточной Камчатки свидетельствуют о преобладающем развитии здесь в новейшее время «алеутских» структур по отношению к «камчатским», т.е. о наложенном характере структур западного окончания Алеутской островной дуги на структуры континентального склона Восточной Камчатки. При рассмотрении распределения афтершоков землетрясения 20 декабря 2018 г. следует учитывать эти сеймотектонические особенности.

Вероятно, с этой структурной особенностью связано начало проработки очаговой зоны в северо-западном («алеутском») направлении при развитии афтершокового процесса землетрясения. Именно в северо-западном кластере афтершокового облака 24 декабря 2018 г. произошел сильный толчок с магнитудой $M_w = 6.1$. В первые несколько суток развитие афтершокового процесса было связано со структурами, простирающимися в направлении ЮЗ–СВ, т.е. в «камчатском» направлении, соответствующему простираению Камчатской сейсмоактивной зоны. Затем начали прорабатываться структуры «алеутского» направления (ЮВ–СЗ). Уже упомянутый здесь сильный афтершок, 24.12.2018, $M_w = 6.1$ произошел на разломе, который мы относим к «алеутскому» направлению. В дальнейшем афтершоки происходили по обоим разрывным структурам. Причем, наблюдается расширение площади афтершоков и продвижение в СЗ направлении, в зону Камчатского пролива и Командорского блока (рис.1).

ПОЛЕ ПАРАМЕТРА V_p/V_s АФТЕРШОКОВОГО ПРОЦЕССА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 20.12.2018, $M_w = 7.3$

Рассмотрим поле параметра V_p/V_s , сформированное в ходе афтершокового процесса. Если взглянуть на рис. 3, на котором представлено распределение афтершоков землетрясения, окрашенных в соответствие со значениями V_p/V_s , полученными для каждого афтершока, то можно сделать заключение, что для абсолютного большинства гипоцентров наблюдаются пониженные значения V_p/V_s . Для более детального анализа построим эмпирические распределения значений V_p/V_s для очаговой области землетрясения (до основного толчка и для афтершоковой последовательности), а также для соседнего района (Командорского блока).

Построенные распределения будем исследовать стандартными методами: параметризуем их с помощью таких величин как математическое ожидание (среднее), медиана, стандартное отклонение и коэффициент асимметрии. Различия между эмпирическими распределениями, построенными по различным выборкам, позволяют судить о степени различия напряженно-деформированного состояния в соответствующих пространственно-временных срезах. Отметим, что чаще всего исследователи ограничиваются изучением динамики первого момента распределения, вопросы о виде распределений также ставятся редко.

Рассмотрим распределения параметра V_p/V_s , в очаговой области обсуждаемого

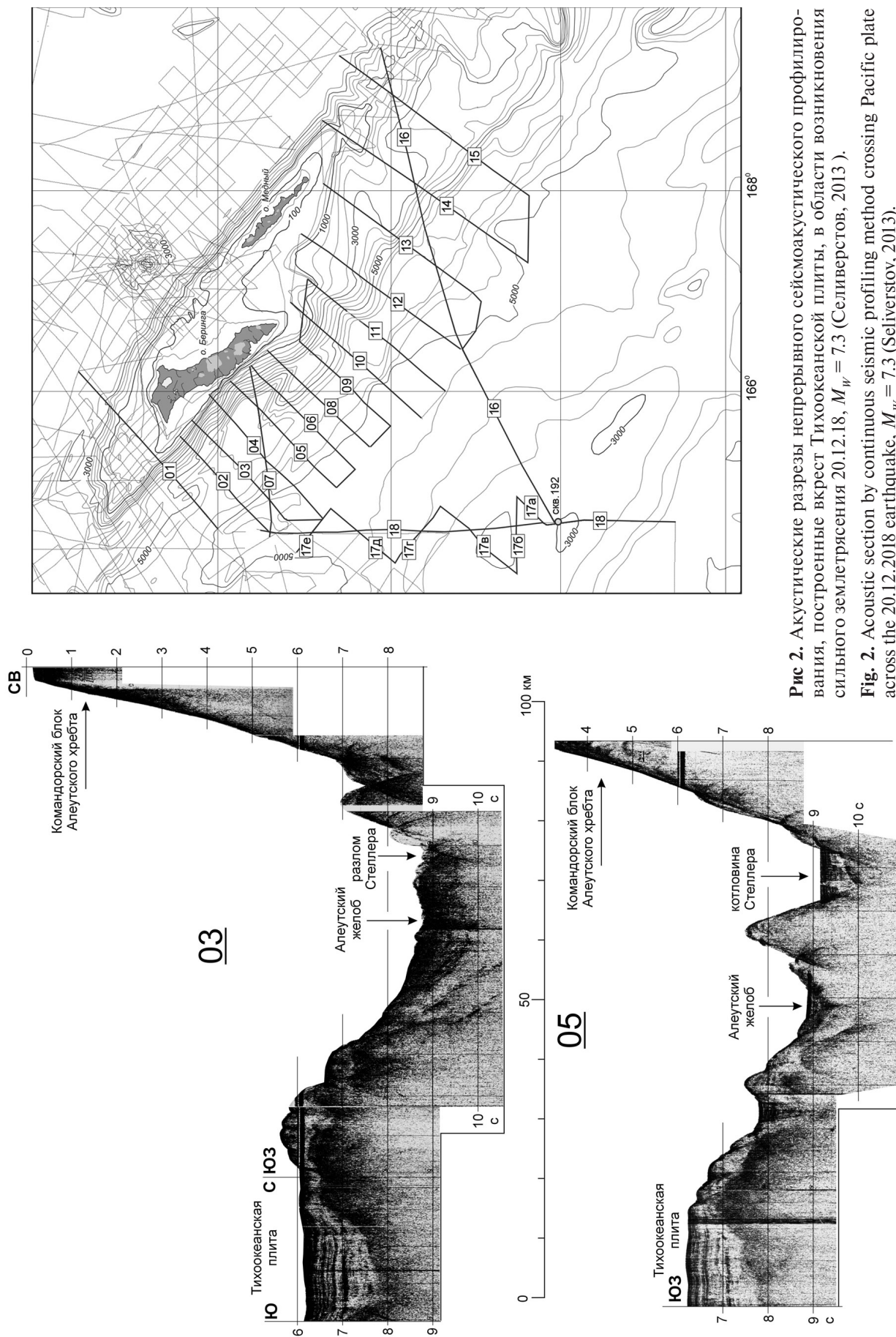


Рис 2. Акустические разрезы непрерывного сейсмоакустического профилирования, построенные вкост Тихоокеанской плиты, в области возникновения сильного землетрясения 20.12.18, $M_w = 7.3$ (Селиверстов, 2013).
Fig. 2. Acoustic section by continuous seismic profiling method crossing Pacific plate across the 20.12.2018 earthquake, $M_w = 7.3$ (Seliverstov, 2013).

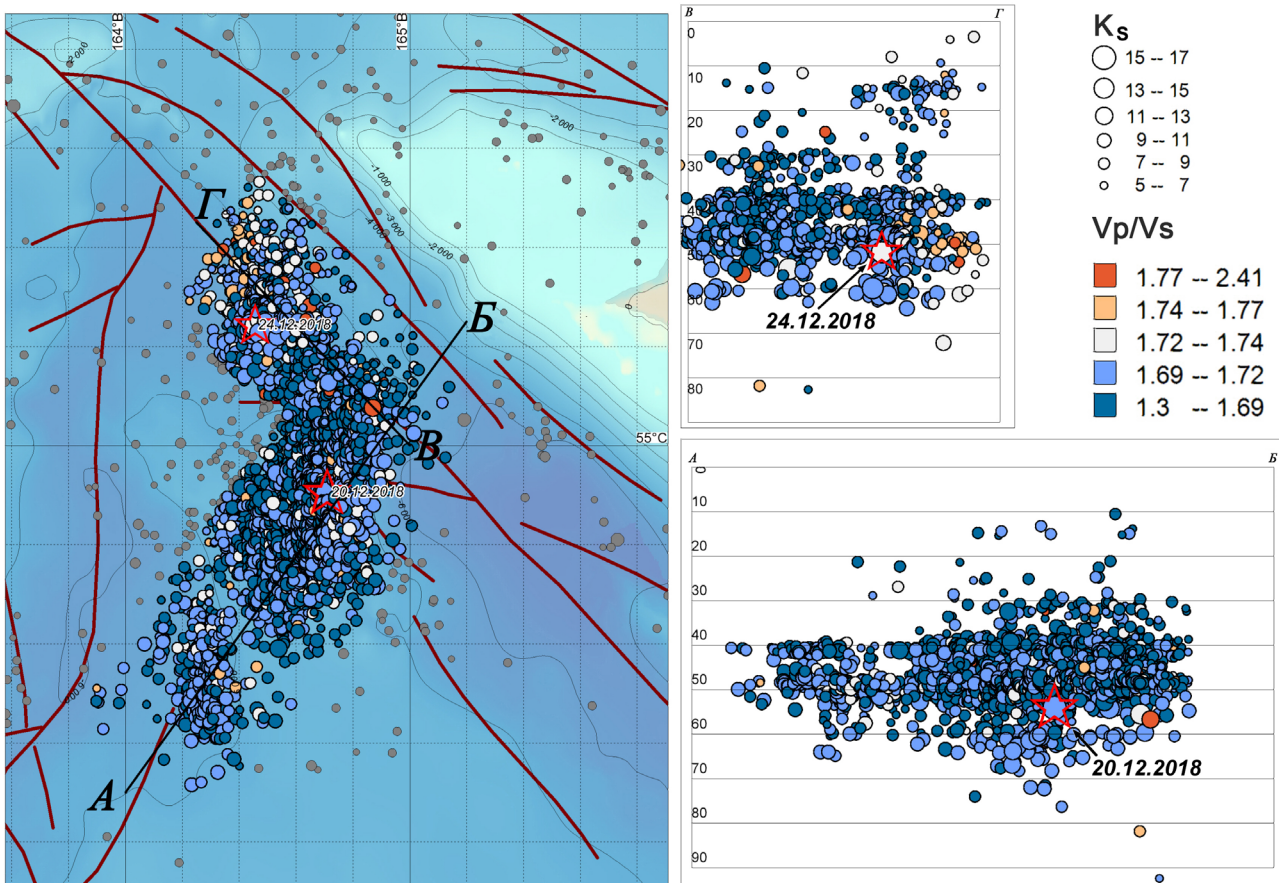


Рис. 3. Пространственная структура поля V_p/V_s облака афтершоков (до 15.06.2019 г.) землетрясения 20 декабря 2018 г. Звездами отмечены основной толчок 20 декабря и сильнейший афтершок 24 декабря 2018 г. Энергетическая классификация — в энергетических классах K_s .

Fig. 3. Spatial distribution of V_p/V_s -field for aftershock cloud of 20.12.2018 earthquake (till 15.06.2019). Main shock and aftershock are marked as red stars, energy class K_s is used as magnitude scale.

землетрясения, и вне ее, в Командорском блоке (рис. 4). Параметры этих распределений сведены в табл. 1.

Видно, что полученные поля V_p/V_s значительно различаются для этих выборок. Можно видеть, что параметр V_p/V_s для афтершоков события 20.12.2018 имеет пониженные значения (<1.68) для почти 31% землетрясений, произошедших в этом районе. Это свидетельствует о значительной доле объема среды, находящейся в дилатантном состоянии и, следовательно, в существенном влиянии растяжения на развитие процесса сброса напряжений. Между тем, в областях, обрамляющих очаг землетрясения (Камчатский шельф, район о. Беринга мы видим преобладание нормальных и повышенных значений V_p/V_s (пониженных значений остается не более 11.5%), что говорит о преобладании сжатия в этих районах. Медианы этих распределений различаются на 0.05, средние значения — на 0.035. Очевидно, это довольно значимые различия. Также мы наблюдаем значимые изменения коэффициента асимметрии γ_1 . Его модуль возрастает при переходе от Командорского блока к очаговой

области изучаемого землетрясения, что говорит об увеличении степени асимметрии. Кроме того, коэффициент меняет знак, что означает, что в Командорском блоке ($\gamma_1 < 0$) наблюдается преобладание повышенных значений V_p/V_s , а в очаговой области — наоборот, преобладание пониженных ($\gamma_1 > 0$).

Рассмотрим динамику развития поля V_p/V_s в очаговой зоне во времени (рис. 5). Параметры соответствующих распределений приведены в табл. 2. Видно, что два распределения также значительно отличаются. Медиана распределения V_p/V_s после землетрясения 20 декабря сместилась в сторону пониженных значений на 0.29, среднее значение — на 0.22. Это говорит о заметном, значимом изменении состояния среды после землетрясения и увеличении степени дилатансии. Таким образом, афтершоковый процесс данного землетрясения, по крайней мере, в рассматриваемый период, происходил в ситуации сильного растяжения. Значительное уменьшение коэффициента асимметрии распределения для афтершокового процесса по сравнению с периодом предвещающим землетрясение также

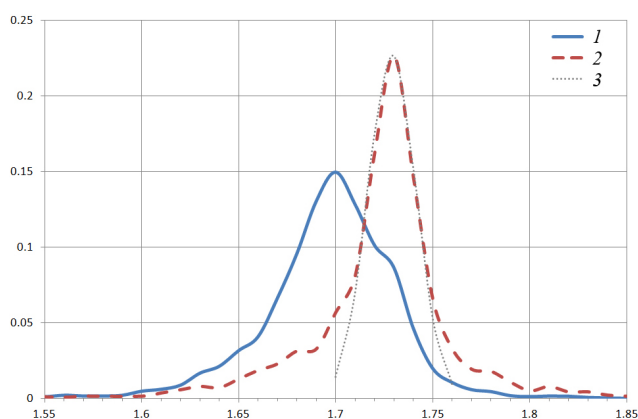


Рис. 4. Нормированные гистограммы распределения параметра V_p/V_s : 1 — для очаговой области землетрясения Углового Поднятия (выборка с 2009 г. по 6.12.2019 г.); 2 — для землетрясений Командорского блока (выборка с 2009 г. по август 2018 г.); 3 — фрагмент распределения Гаусса с математическим ожиданием, соответствующем эмпирическому распределению «2» на данном рисунке, подобранное стандартное отклонение $\sigma = 0.012$, нормировка на максимум.

Fig. 4. Normalized distributions of V_p/V_s -parameter: 1 — for earthquakes of source area of Corner Rise Earthquake (2009–6.12.2019); 2 — for earthquakes of Commander microplate; 3 — central part of Gauss distribution (rationing on maximum) with expected value corresponded to distribution «2» from this figure, estimated standard deviation is $\sigma = 0.012$.

говорит о том, что процессы релаксации в очаге, по-видимому, протекали в условиях однородной напряженно-деформированной обстановки.

Для оценки значимости различий между построенными распределениями в первом приближении, можно воспользоваться (со всеми оговорками), критерием Стьюдента. Тогда окажется, что уровень значимости различий пар распределений окажется $\alpha < 0.001$ (рис. 4, 5). Это позволяет утверждать о принципиально различных сеймотектонических обстановках в различных выборках.

Отметим также еще одно важное различие между парами распределений, изображенных на рис. 4, 5. В обоих случаях мы видим, что одно распределение в центральной части «почти правильное» — нормальное, а второе существенно отличается от нормального закона. Можно предположить, что симметричное колоколообразное распределение параметра V_p/V_s соответствует стабильному, устоявшемуся деформационному режиму. В случае же когда в среде происходят перестройки, смены режимов, аккомодационные процессы блоковой среды и т.п., следует ожидать усиление искажения формы распределения: возникновение мультимодальности, асимметрии, появление тяжелых хвостов, а также увеличение дисперсии.

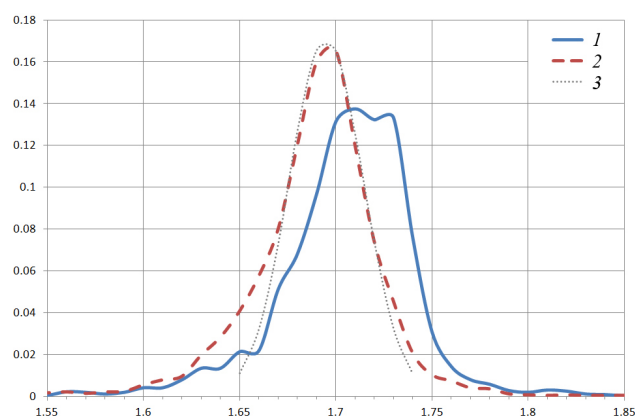


Рис. 5. Нормированные гистограммы распределения параметра V_p/V_s , для очаговой области землетрясения Углового Поднятия: 1 — для периода 2009–19.12.2018, до землетрясения; 2 — для периода 20.12.2018–1.09.2019, первые месяцы афтершокового процесса; 3 — фрагмент распределения Гаусса с математическим ожиданием, соответствующем эмпирическому распределению «2» на данном рисунке, подобранное стандартное отклонение $\sigma = 0.019$, нормировка на максимум.

Fig. 5. Normalized distributions of V_p/V_s -parameter for source area of Corner Rise Earthquake: 1 — before mainshock, 2009–19.12.2018; 2 — for initial period of aftershock sequence, 20.12.2018–1.09.2019; 3 — central part of Gauss distribution (rationing on maximum) with expected value corresponded to distribution «2» from this figure, estimated standard deviation is $\sigma = 0.019$.

Таблица 1. Параметры эмпирических распределений параметра V_p/V_s для Командорского блока и очаговой области землетрясения 20.12.2018 г.

Table 1. Parameters of empiric distributions of V_p/V_s -value for Komandore block and for the source area of 20.12.2018 earthquake

Локализация выборки	M_e	$\overline{V_p/V_s}$	σ	γ_1	Объем выборки
Командорский блок	1.745	1.724	0.04	-0.039	1405
Очаговая область	1.695	1.689	0.039	0.083	7811

Таблица 2. Параметры эмпирических распределений параметра V_p/V_s в очаговой области землетрясения 20.12.2018 до и после основного события

Table 2. Parameters of empiric distributions of V_p/V_s -value for the source area of 20.12.2018 earthquake before the mainshock, and after it

Период выборки	M_e	$\overline{V_p/V_s}$	σ	γ_1	Объем выборки
2009 – 19.12.2018	1.72	1.709	0.038	1.27	3648
20.12.2018 – 06.01.2019	1.691	1.687	0.034	0.41	4163

Рассмотрим подробно распределение параметра V_p/V_s для Командорского блока (рис. 4). Исходя из сделанных выше предположений, можно заключить, что сейсмический режим в Командорском блоке оставался стабильным в течение большей части периода наблюдений. В пользу этого свидетельствует значительная (~80%) часть событий, формирующая центральную, колоколообразную часть распределения. В это же время в очаговой области исследуемого землетрясения мы видим искаженную форму распределения. Очевидно, она формируется как суперпозиция двух распределений, нормированные версии которых представлены на рис. 5.

В свою очередь на рис. 5 отмечается возможное установление стабильного деформационного режима в начальной стадии афтершокового процесса. В период до землетрясения распределение имеет сложную форму, что может свидетельствовать как о разупорядоченном состоянии среды в целом, так и о смене фаз деформационного режима в период подготовки землетрясения.

Следует отметить, что закономерности поведения полей кинематического параметра V_p/V_s требуют дальнейшего изучения. Очевидно, при этом не следует рассматривать нормальный закон как хорошее универсальное приближение для эмпирических распределений V_p/V_s , это заметно даже после беглого взгляда на вид распределений (рис. 4, 5). Такое приближение может использоваться только для первичного анализа, которого вполне достаточно, например, для целей данной работы. Глубокий анализ статистик потребует привлечения более строгих методов.

Развитие афтершокового процесса во времени и пространстве можно в общих чертах проследить по рис. 1. Видно, что в течение первых суток в афтершоковый процесс была вовлечена вся очаговая область, имеющая сложную форму, а к июню подавляющее число афтершоков было локализовано в областях вблизи основного толчка и сильнейшего афтершока. Сложная форма облака афтершоков, вероятно, свидетельствует о сложно организованном очаге. Условно его можно разбить на три кластера — центральный (связанный с основным толчком), северо-западный (сильнейший афтершок 24 декабря) и южный кластер. Южный фланг поля афтершоков включился на следующий день после основного события, и интенсивность выделения энергии здесь была невысока (Чебров и др., 2020).

Вертикальные разрезы по профилям АБ и ВГ (рис. 3) позволяют изучить распределение афтершоков по глубине, а также глубинную структуру поля V_p/V_s во время афтершокового процесса. Профиль АБ соответствует «кам-

чатскому» направлению, ВГ — «алеутскому». Для всей афтершоковой последовательности в целом характерно пониженное значение V_p/V_s (рис. 5). При этом картина поля V_p/V_s не однородна, можно отметить группирование в пространстве гипоцентров, для которых характерны самые низкие значения $V_p/V_s < 1.69$. Как уже отмечалось, это может свидетельствовать о дилатансионном режиме сброса напряжений в процессе растяжения в очаговой области. Это подтверждается и механизмом главного толчка. В плане, и на профиле ВГ (рис. 3) можно выделить группу афтершоков с повышенными значениями параметра V_p/V_s . Такие события появились в северо-западном кластере облака афтершоков с 18 января 2019 г. и локализируются в северо-западной части этого кластера. Очевидно, в очаговый процесс были вовлечены объемы среды, для которых характерен деформационный режим определяющийся состоянием сжатия.

Характер поля напряжений на этом участке сочленения Тихоокеанской плиты с Курило-Камчатской и Алеутской фокальными зонами отражается и в механизмах очагов землетрясений, происходивших в этом регионе в течение длительного периода времени. На картах показаны размещение осей сжатия и растяжения по данным Мирового каталога тензоров-центроидов моментов землетрясений (Dziewonski et al, 1981) за период 1978–2019 гг. (рис. 6).

По положению осей можно видеть, что направление осей растяжения со стороны Алеутской островной дуги в основном СЗ–ЮВ. В то же время со стороны Курило-Камчатского желоба можно видеть преобладание направления ЮЗ–СВ. Оси сжатия расположены вкрест направления желобов. Такая ориентация осей сжатия и обусловила сдвиговый механизм сильного афтершока 24 декабря 2018 г. с $M_w = 6.1$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше результаты анализа поля V_p/V_s , сравнение с механизмами очагов сильных событий подтверждают выводы о том, что кинематический параметр V_p/V_s характеризует упругие и прочностные особенности геофизической среды. Кроме того, он отражает характер и изменения поля напряжений. С помощью картирования параметра по площади могут быть выявлены глубинные, подчас погребенные, сеймотектонические структуры, определяющие деформационный режим региона. Наблюдаемые зоны смены знака аномалий, градиентные зоны, вероятнее всего свидетельствуют о погребенных разломах. Области повышенного градиента поля могут рассматриваться

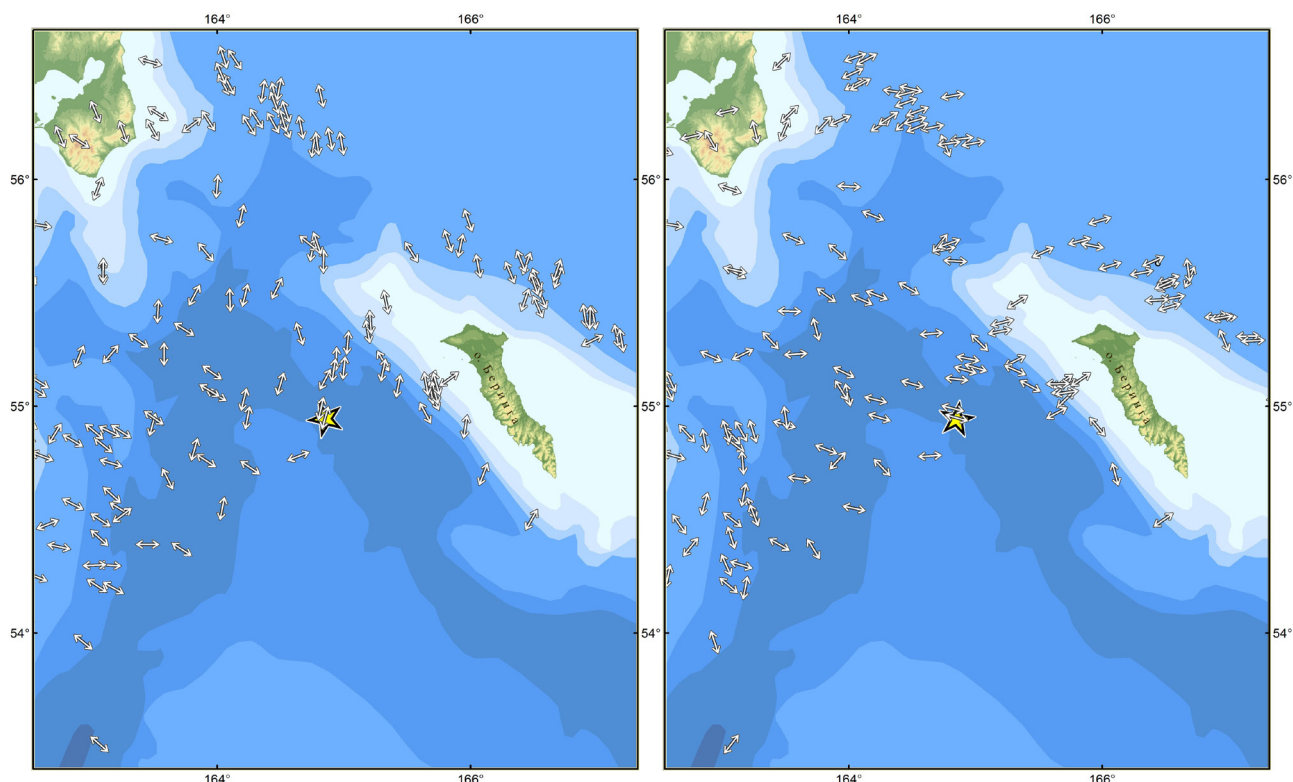


Рис. 6. Оси сжатия (слева) и растяжения (справа) по механизмам землетрясений, происходивших в районе сочленения Тихоокеанской плиты с Курило-Камчатской и Алеутской островодужными системами в 1976–2018 гг. по данным каталога «Global CMT catalogue» (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>).

Fig. 6. Press axes (left) and tension axes (right) calculated for focal mechanisms (1976–2018) from «Global CMT catalogue» (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>) for the region of Kuril-Kamchatka and Aleutian trenches conjunction.

как погребенные тектонические структуры, в том числе и ступени, с резким перепадом высот в фундаменте и верхах мантии. А также как возможные готовящиеся очаговые зоны будущих сильных землетрясений.

Характер поля V_p/V_s в афтершоковый период землетрясения Углового Поднятия свидетельствует об изменении режима реализации накопленных напряжений в очаговой области землетрясения за счет увеличения доли дилатансионного растяжения. Во время развития афтершокового процесса устойчиво сохраняется дилатансионное растяжение в очаговой зоне. Также отмечено существенное различие деформационных режимов между очаговой областью землетрясения Углового Поднятия, и окружающими территориями, в частности — Командорским блоком.

Систематическое прослеживание и картирование в пространстве и времени параметра V_p/V_s позволяет оценить характер поля напряжений в сейсмоактивной области и проследить его развитие.

В заключение скажем несколько слов о методике изучения полей параметра V_p/V_s , основанной на анализе эмпирических распределений V_p/V_s для пространственно-временных выборок.

Показано, что именно анализ распределений позволяет обнаружить различия деформационных режимов в пространстве-времени и при этом оценить статистическую значимость этих различий. Далее нами сделано предположение, что в качестве меры однородности напряженно-деформированного состояния среды можно использовать характеристики эмпирических распределений параметра V_p/V_s . Действительно, в случаях, когда мы предполагаем однородный режим, распределение V_p/V_s симметрично и имеет «нормальную», колоколообразную форму. В случаях, когда у нас есть основания предполагать наличие неоднородностей, связанных, в том числе с процессами изменения напряженно-деформированного состояния среды, наблюдается разладка и в распределении V_p/V_s . Это выражается в появлении асимметрии, мультимодальности, а также увеличении дисперсии. Очевидно, это более мощный и перспективный способ для анализа полей этого параметра, чем оперирование только лишь средними значениями. Также можно предположить, что изменение свойств распределений может иметь и прогностический потенциал. Отметим, в заключение, что все сделанные предположения требуют тщательной проверки.

Список литературы [References]

- Гарагаш И.А.* О хрупком разрушении упругих тел с большим числом трещин. Механика тектонических процессов. Алма-Ата: Наука, 1983. С. 61–74 [*Garagash I.A.* Brittle destruction of elastic bodies with a large number of cracks. Mechanics of tectonic processes. Alma-Ata: Nauka, 1983. P. 61–74 (in Russian)].
- Гарагаш И.А., Хайдаров М.С.* Модель развития сейсмического процесса в зоне тектонического разлома перед сильным землетрясением // Сейсмологические исследования. 1989. № 11. С. 88–97 [*Garagash I.A., Khaidarov M.S.* Model of the development of the seismic process in the tectonic fault zone before a strong earthquake // Seismological Research. 1989. № 11. P. 88–97].
- Гордеев Е.И., Пинегина Т.К., Ландер А.В., Кожурин А.И.* Берингия: сейсмическая опасность и фундаментальные вопросы геотектоники // Физика Земли. 2015. № 4. С. 58–67 [*Gordeev E.I., Pinegina T.K., Lander A.V., Kozhurin A.I.* Beringia: Seismic hazard and fundamental problems of geotectonics // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2015. V. 51. № 4. P. 512–521].
- Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с. [*Nikolaevsky V.N.* Geomechanics and fluid mechanics. Moscow: Nedra, 1996. 447 p. (in Russian)].
- Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило - Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Кам ГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с. [*Seliverstov N.I.* Geodynamics of Kuril-Kamchatka and Aleutian island arcs conjunction. Petropavlovsk-Kamchatky: KamGU Vitus Bering, 2009. 191 p. (in Russian)].
- Селиверстов Н.И.* Подводные морфоструктуры Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2013. 162 с. [*Seliverstov N.I.* Undersea morphostuctures of Kuril-Kamchatka and Aleutian island arcs. Petropavlovsk-Kamchatky: IVS FEB RAS. 2013. 162 p. (in Russian)].
- Селиверстов Н.И.* Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный Мир. 1998. 164 с. [*Seliverstov N.I.* Structure of Kamchatka seabed and geodynamics of Kuril-Kamchatka and Aleutian island arcs conjunction. Moscow: Nauchniy Mir, 1998. 164 p. (in Russian)].
- Славина Л.Б., Мячкин В.В.* Кинематические предвестники сильных сейсмических событий (методика и результаты прогноза землетрясений на примере Камчатки). // Геофизические исследования. 2005. № 3. С. 24–37 [*Slavina L.B., Myachkin V.V.* Kinematic precursors of strong seismic events (methods and results of earthquake prediction on the example of Kamchatka) // Geophysical Research. 2005. № 3. P. 24–37 (in Russian)].
- Фокина Т.А., Коваленко Н.С., Костылев Д.А. и др.* Приамурье и Приморье, Сахалин и Курило-Охотский регион // Землетрясения России в 2017 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 48–55 [*Fokina T.A., Kovalenko N.S., Kostylev D.A. et al.* Priamurye and Primorye, Sakhalin and Kuril-Okhotsk region // Earthquakes in Russia, 2017. Obninsk: GS RAS, 2019. P. 48–55 (in Russian)].
- Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология 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].
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р. и др.* Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w = 7.8$ на границе Командорской сейсмической бреши // Вестник КРАУНЦ. 2017. № 3. Вып. 35. С. 22–25 [*Chebrov D.V., Kugaenko Yu.A., Abubakirov I.R. et al.* The July 17th, 2017 Near-Aleutian earthquake with $M_w = 7.8$ on the border of the Komandor seismic gap (western part of the Aleutian Arc) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2017. № 3(35). P. 22–25 (in Russian)].
- 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>].
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др.* 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. №1. Вып. 45. С. 100–117. <http://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-1-45-100-117> [*Chebrov D.V., Kugaenko Yu.A., Lander A.V. et al.* The Uglovoye Podnyatiye earthquake on December 20, 2018 ($M_w = 7.3$) in the junction zone between Kamchatka and Aleutian oceanic trenches // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2020. № 1(45). P. 110–117 (in Russian).]
- Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H.* Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 2825–2852. <https://doi.org/10.1029/JB086iB04p02825>.
- Saltykov V., Kugaenko Yu., Voropaev P., Kravchenko N.* The July 17, 2017 $M_w 7.8$ Earthquake in the Bering Fracture Zone: Dynamics of Foreshock-Aftershock Process // 10th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes (JKASP). Volcanism and tectonic earthquakes in the subduction zone. August 2018. Petropavlovsk-Kamchatsky. http://www.kscnet.ru/ivs/conferences/jkasp2018/pdf/SaltykovVA_20-11.pdf.

КУЧАЙ и др.

**EVOLUTION OF AFTERSHOCK SEQUENCE OF DECEMBER 20, 2018
STRONG EARTHQUAKE ($M_w = 7.3$) AND ITS REFLECTION
IN V_p/V_s -PARAMETER FIELD**

M.S. Kuchay¹, L.B. Slavina¹, D.V. Chebrov²

¹*The Schmidt Institute of Physics of Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 123242; kuchay@ifz.ru*

²*Kamchatka Branch of Geophysical Survey of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006; danila@emsd.ru*

The paper presents the results of calculations, as well as further analysis of the kinematical parameter V_p/V_s in the source area of the strong earthquake ($M_w = 7.3$), which occurred on December 20, 2018 at the junction of the Kurile-Kamchatka and Aleutian trenches. Calculations of the V_p/V_s field based on the results of processing the parameters of moderate and weak earthquakes ($M_w \leq 6.5$) in the earthquake source area and its surroundings, registered by the system of seismic observations of the Kamchatka branch of Federal Research Center « Geophysical Survey of RAS» in the period from 2009 to 15.06.2019. The results of the analysis of the V_p/V_s field and its comparison with the mechanisms of strong events in the vicinity of the source area of the studied earthquake lead us to the conclusion that the kinematic parameter V_p/V_s characterizes the elastic and strength properties of the geophysical environment, and also reflects the nature and changes in the stress field. The paper discusses also the probable effect of deformation regime on the type and form of distribution of the V_p/V_s parameter. This may be of particular importance for the development of methods of earthquake prediction and diagnosis of the environment.

Keywords: Kamchatka, earthquake of Corner Rise, seismicity, aftershock, V_p/V_s parameter.

Поступила в редакцию 07.04.2020 г.