

УДК 550.34

## К ОЦЕНКЕ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ КОМАНДОРСКОГО БЛОКА АЛЕУТСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ ПО ДАННЫМ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА $V_p/V_s$ И МЕХАНИЗМАМ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2019 г. Л.Б. Славина, М.С. Кучай

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

По кинематическому параметру  $V_p/V_s$  проведены исследования динамики поля напряжений геолого-геофизической среды Командорского блока Алеутской островной дуги. Используются данные наблюдений сейсмического режима, проводимых на стационарных сейсмических цифровых станциях Камчатского филиала Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН”.

Установлено, что по характеру распределения аномальных значений  $V_p/V_s$  в пространстве и по глубине могут быть прослежены особенности поля напряжений для тектонических структур и разломов, оценены характер и тип смещений по ним. Поле напряжений по кинематике свидетельствует о сдвиговом характере дислокаций вдоль разлома Беринга, одного из самых сейсмоактивных разломов Командорского блока Алеутской островной дуги. Для северо-восточной плоскости разлома, погружающейся под Командорскую котловину, характерны пониженные значения  $V_p/V_s$ , что может свидетельствовать о дилатансионном характере процесса растяжения в поле напряжений.

Оценки поля напряжений по параметру  $V_p/V_s$  были сопоставлены с механизмами очагов сильных землетрясений, имевших место в исследуемом регионе в последние годы.

Разрезы, построенные по полю параметра  $V_p/V_s$ , представлены в сопоставлении с акустическими разрезами, полученными в середине прошлого столетия при морских работах методом непрерывного сейсмического профилирования в рамках проведения Международного геофизического года.

Рассмотрен вопрос о существовании субдукции, т.е. погружении Тихоокеанской плиты под Командорский блок.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования методики наблюдений за параметром  $V_p/V_s$  по данным региональной сейсмической активности для оперативной оценки поля напряжений.

**Ключевые слова:** землетрясение, скорости сейсмических волн, параметр  $V_p/V_s$ , зона субдукции, Командорский блок, Алеутская островная дуга.

### Введение

По кинематическому параметру  $V_p/V_s$  проведены исследования геолого-геофизической среды Командорского блока Алеутской островодужной системы и его сочленения с камчатскими структурами. Используются наблюдения сейсмического режима, осуществляемые в реальном времени стационарными сейсмическими цифровыми станциями Камчатского филиала Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” (КФ ФИЦ ЕГС). Анализ сейсмической активности на уровне региональных землетрясений за исследуемый период 2017–2018 гг. представлен по данным КФ ФИЦ ЕГС; для длительного интервала времени инструментальных наблюдений 1908–2018 гг. были использованы данные каталога *NEIC USGS*<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> <https://earthquake.usgs.gov/contactus/golden/neic.php>

Расчет кинематического параметра  $V_P/V_S$  осуществлялся по данным о временах вступления объемных  $P$ - и  $S$ -волн от региональных землетрясений, зарегистрированных и обработанных сейсмической службой Камчатского филиала.

### Методические особенности расчета кинематического параметра $V_P/V_S$

Остановимся кратко на основных особенностях методики расчета кинематического параметра  $V_P/V_S$ , подробно описанной в ряде работ [Славина, Горельчик, 1989, Славина, Кузьмина, Мячкин, 1991]. Параметр  $V_P/V_S$  рассчитывается аналитически; его единичные значения определялись по формуле

$$V_P/V_S = (T_S - T_P)/(T_P - T_0) + 1,$$

где  $T_P$  – время прихода  $P$ -волны;  $T_S$  – время прихода  $S$ -волны;  $T_S - T_P$  – разность времен прихода  $P$ - и  $S$ -волн на станции регистрации;  $T_0$  – время в очаге землетрясения, найденное при определении параметров гипоцентров слабых землетрясений по данным группы сейсмостанций. Очевидно, что  $T_0$  является важным параметром при определении  $V_P/V_S$ , поскольку ошибки в значениях  $V_P/V_S$  зависят от метода определения параметров гипоцентров и в особенности от способа определения  $T_0$ .

Методику расчета единичных значений  $V_P/V_S$  по временам вступления  $P$ - и  $S$ -волн на станциях регистрации и их разности  $T_S - T_P$  иллюстрирует приводимый на рис. 1 график Вадати. Времена прихода поперечных волн на станции 1 и 2 обозначены как  $T_S^1$ ,  $T_S^2$ , продольных – как  $T_P^1$ ,  $T_P^2$ . По оси ординат наносятся значения  $\Delta T_{S-P} = T_S - T_P$  для двух (или более) станций, по оси абсцисс – значения времен вступлений  $P$ -волны на тех же станциях. Линия, усредняющая точки вступления для станций, зарегистрировавших данное событие, при пересечении оси абсцисс и определяет время в очаге –  $T_0$  (в очаге разность  $\Delta T_{S-P}$  равна 0). По значению  $T_0$ , определенному при расчете параметров гипоцентра по группе станций, мы можем рассчитать индивидуальные значения  $V_P/V_S$  для каждой станции в отдельности. В приводимом примере для станции 1 имеем  $(V_P/V_S)^1 = \Delta T_{S-P}^1 / (T_P^1 - T_0) + 1$ , для станции 2 –  $(V_P/V_S)^2 = \Delta T_{S-P}^2 / (T_P^2 - T_0) + 1$ .

Тангенс угла наклона усредняющей линии графика Вадати при угле  $60^\circ$  равен 1.73, и это значение считается нормальным для параметра  $V_P/V_S$  в упругой среде.

Отношение скоростей в упругой среде может быть выражено также через параметры Ламе. В линейной теории упругости закон Гука выражает линейную зависимость между тензором деформации  $\epsilon$  и тензором напряжений  $\sigma$  в упругой среде:

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

где  $\lambda$  и  $\mu$  – параметры Ламе. Второй параметр Ламе  $\mu$  совпадает с модулем сдвига.

Модуль всестороннего сжатия  $K$  выражается через параметры Ламе как

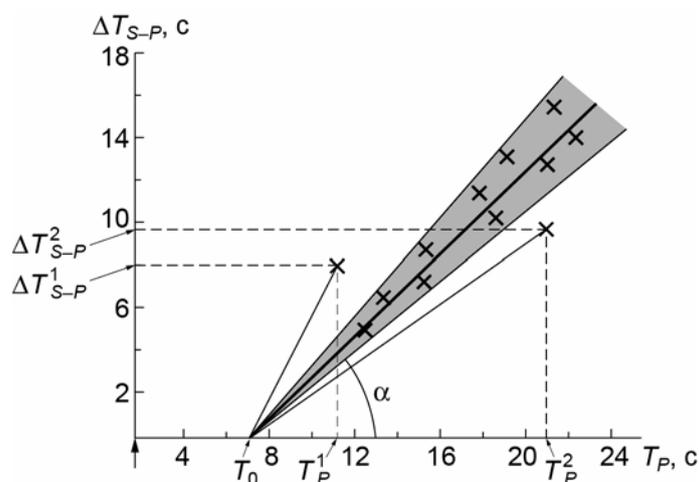
$$K = \lambda + \frac{2}{3}\mu.$$

Параметры Ламе связаны с модулем Юнга  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\nu$  соотношениями:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

Когда упругие параметры  $\mu$  и  $\lambda$  равны между собой, значение параметра  $V_P/V_S$  определяется как  $\sqrt{3}$  и составляет 1.73:

$$V_P/V_S = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\mu} = \sqrt{3} = 1.73.$$



**Рис. 1.** Схема графика Вадати, иллюстрирующая методику расчета  $V_P/V_S$  по временам вступления  $P$ - и  $S$ -волн на станциях регистрации. Серым цветом закрашен коридор  $V_P/V_S$  (1.68–1.73–1.78); крестики – точки вступления волн для станций, зарегистрировавших событие, утолщенная прямая – их усредняющая

**Fig. 1.** Scheme of the Vadati plot, illustrating the method of calculating  $V_P/V_S$  by the arrival times of  $P$ - and  $S$ -waves at the recording stations. The corridor  $V_P/V_S$  (1.68–1.73–1.78) is colored in gray; crosses are points of wave entry for stations that registered the event, thickened line is their average

Приведенные выше формулы и соотношения, связывающие упругие параметры, однозначно свидетельствуют о прямой связи параметра  $V_P/V_S$  с тензором деформации  $\epsilon_{ij}$  и тензором напряжений  $\sigma_{ij}$ .

В сейсмоактивной зоне под воздействием поля напряжений происходят слабые землетрясения. “Растрескивание” среды сопровождается дилатансионным расширением и уменьшением отношения  $V_P/V_S$ . При сжатии (закрытии трещин) отношение  $V_P/V_S$  увеличивается. При этом, как отмечает И.А. Гарагаш, именно смыкание берегов трещин с проскальзыванием, а не просто “исчезновение” трещин может обеспечить отношение скоростей, превышающее значение  $V_P/V_S = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\mu}$  для тела без трещин [Гарагаш, 1983; Гарагаш, Хайдаров, 1989; Nikolaevskiy, Garagash, 2004]. Таким образом, можно считать, что параметр  $V_P/V_S$  отражает поле напряжений и его изменения в сейсмотектонически активной зоне.

Это положение позволило нам провести исследование особенностей распределения в пространстве и изменений (или стабильности) во времени параметра в тектонически активном регионе. “Нормальными” значениями  $V_P/V_S$  считались  $1.73 \pm 0.05$ ; как пониженные рассматривались значения менее 1.68, повышенные – более 1.78. При этом мы исходили из предположения об ошибках, которые могли иметь место при определении времен вступлений  $P$ - и  $S$ -волн и времени в очаге  $t_0 T_0$ .

### Описание сейсмотектонического строения района исследований

Западный сегмент Алеутской дуги является сложным сейсмотектоническим узлом как с позиций тектоники и геодинамики, так и в плане сейсмической активности. Это район, где сочленяются Курило-Камчатская и Алеутская островные дуги, характеризующиеся сложным строением, в том числе и наличием зон субдукции. В этом сегменте Тихоокеанская плита, отчасти включающая продолжение Императорского

хребта и возвышенность Обручева, погружается под сложнопостроенный Командорский блок и под шельф п-ова Камчатка. Командорский блок включает Командорские острова, Командорскую котловину, подводные хребты Ширшова и Бауэрса; последний замыкает с юго-востока западный сегмент Алеутской дуги. Как островной, так и океанический борта Командорской ветви Алеутского желоба осложнены многочисленными поперечными, продольными и диагональными уступами, ограничивающими грабенообразные прогибы и сопряженные с ними выступы. Схематическая карта района исследований, на которой обозначены его основные морфологические структуры, приведена на рис. 2; на карту вынесены механизмы сильных событий из каталога *NEIC*.



**Рис. 2.** Схематическая карта района исследований с отмеченными эпицентрами сильных землетрясений. Механизмы событий приведены по данным каталога *NEIC*

**Fig. 2.** Schematic map of the study area with marked epicenters of strong earthquakes. The mechanisms of events are given according to the *NEIC* catalog

Каталог сейсмических событий с указанием времени возникновения, координат эпицентров и магнитуд землетрясений представлен в табл. 1 (по данным *NEIC*).

Исследуемый район был достаточно хорошо изучен в ходе геолого-геофизических работ, проведенных в середине прошлого столетия в рамках Международного геофизического года (МГГ), и в последующие годы. По программе МГГ в исследуемом сегменте и на прикамчатских акваториях было впервые выполнено глубинное сейсмическое зондирование (ГСЗ) земной коры, проведены аэромагнитные и морские гравиметрические наблюдения. Наблюдения методом ГСЗ проводились по трем профилям, в том числе по профилям 8-М, 8-0, проходящим от южной части хр. Ширшова вкост структур западного сектора Алеутской островной дуги. Эти исследования впервые позволили изучить закономерности строения земной коры региона, выделив ее основные типы [Строение..., 1964; Зверев, Капустян, 1980].

**Таблица 1.** Сейсмические события, произошедшие в исследуемом районе по данным каталога *NEIC* в 1977–2017 гг.

Время UTC	Координаты		Глубина $H$ , км	Магнитуда, $M$	Район
	°с.ш.	°в.д.			
08.10.2017 г., 22:34:33.490	52.3909	176.769	119	6.5	57 км к востоку от влк. Булдира, п-ов Аляска
17.07.2017 г., 23:34:13.740	54.4434	168.857	10	7.7	Командорские о-ва
02.06.2017 г., 22:24:47.440	54.0312	170.92	5	6.8	Ближние о-ва
29.03.2017 г., 04:09:24.190	56.9401	162.786	17	6.6	Командорские о-ва
23.06.2014 г., 20:53:09.700	51.8486	178.735	109	7.9	о. Малый Ситкин, п-ов Аляска
14.06.2006 г., 04:18:42.510	51.752	177.082	14	6.5	Крысьи о-ва
14.06.2005 г., 17:10:12.280	51.239	179.314	17	6.8	
10.06.2004 г., 15:19:57.750	55.682	160.003	188.6	6.9	п-ов Камчатский
05.12.2003 г., 21:26:09.480	55.538	165.78	10	6.7	Командорские о-ва
17.11.2003 г., 06:43:06.800	51.146	178.65	33	7.8	Крысьи о-ва
23.06.2003 г., 12:12:34.470	51.439	176.783	20	6.9	
15.06.2003 г., 19:24:33.150	51.552	176.923	20	6.5	
17.03.2003 г., 16:36:17.310	51.272	177.978	33	7.1	
07.11.2002 г., 15:14:06.760	51.197	179.334	33	6.6	
08.10.2001 г., 18:14:26.440	52.591	160.324	48.5	6.5	У восточного берега п-ова Камчатка
17.12.1997 г., 04:38:51.460	51.187	178.871	20	6.6	Крысьи о-ва
05.12.1997 г., 11:26:54.690	54.841	162.035	33	7.8	У восточного берега п-ова Камчатка
26.03.1997, 02:08:57.270	51.277	179.533	33	6.7	Крысьи о-ва
16.07.1996 г., 03:48:28.340	56.084	164.998	33	6.5	Командорские о-ва
22.03.1996 г., 03:24:20.010	51.221	178.695	20.4	6.8	Крысьи о-ва
23.04.1995 г., 02:55:55.110	51.334	179.714	16.9	6.5	
06.11.1990 г., 20:14:29.740	53.452	169.871	24.8	7.1	Командорские о-ва
29.02.1988 г., 05:31:41.470	55.149	167.43	33	6.9	
02.05.1986 г., 10:30:02.850	55.172	163.843	14.8	6.8	У восточного берега п-ова Камчатка
28.12.1984 г., 10:37:53.760	56.194	163.46	33	6.7	
17.08.1983 г., 10:55:54.130	55.867	161.287	62.6	7.1	
30.01.1981 г., 08:52:44.100	51.744	176.274	33	7	Крысьи о-ва
04.09.1977 г., 17:24:42.800	51.144	177.954	8	6.6	
19.02.1977 г., 22:34:04.100	53.566	170.032	33	6.7	Алеутские о-ва

В ходе названных исследований были подробно изучены рельеф дна, структура осадочного чехла, аномальное магнитное поле и тепловой поток южной, центральной и западной частей Командорской котловины. Кроме того, был изучен состав пород молодых вулканических вершин подводного вулкана Пийпа, установлены признаки современной гидротермальной активности этого вулкана и особенности структурно-тектонического контроля магматических проявлений в южной части котловины [Селиверстов, 1998; Муравьев и др., 1990].

Командорская котловина характеризуется океанической структурой земной коры. Этот вывод был сделан по результатам ГСЗ, проведенного в юго-восточной части котловины (профиль 8-М) в период МГГ (1957–1958), и подтвержден более поздними исследованиями ГСЗ по системе разноориентированных профилей в центральной части котловины [Shor, Fornari, 1976]. Мощность земной коры в центральной части котловины составляет около 7 км. При этом земная кора Командорской котловины несколько отличается от “типичной океанической” увеличенной (более 3 км) мощностью второго слоя с  $V_P=5.5$  км/с и сокращенной (около 2.5 км) мощностью “базальтового” слоя с  $V_P=6.8$  км/с. Также в этой области была обнаружена анизотропия скоростей  $P$ -волн по границе Мохоровичича – азимутальные вариации скорости составили от 7.9 км/с в направлении на север–северо-восток и до 8.1 км/с в запад–северо-западном направлении.

Перечисленные геофизические исследования позволили построить многочисленные акустические профили (разрезы), дающие представления о структурно-тектоническом строении региона. Наиболее полные исследования относятся к Командорской котловине, где выполнена достаточно представительная опорная сеть профилей МОВ ОГТ.

Таким образом, проведенные исследования позволили получить структурно-тектонический план исследуемого региона с выделением наиболее значимых разрывных нарушений, депрессий, грабенов, структурно видимых котловин. Следует отметить, что наиболее сложные по тектоническому строению участки региона отличаются максимальной сейсмической активностью в настоящее время.

Остановимся более подробно на структурно-тектоническом строении исследуемого сегмента Алеутской дуги, что необходимо для дальнейшего анализа поля напряжений по параметру  $V_P/V_S$ . Согласно Н.И. Селиверстову [1998], западный сектор Алеутской островной дуги включает Командорский блок Алеутского хребта и прилегающий участок Алеутского глубоководного желоба. Островной шельф Командорского блока представляет собой плоскую абразионно-аккумулятивную равнину, большая часть которой отличается сложным мезорельефом, имеющим, вероятно, субэральное происхождение. Поверхность шельфовой террасы со стороны Тихого океана и Берингова моря срезается крутыми склонами тектонического происхождения, имеющими линейные очертания. Ниже эта особенность строения будет рассмотрена на разрезах, построенных по параметру  $V_P/V_S$ . Борта Командорской ветви Алеутского желоба осложнены многочисленными поперечными, продольными и диагональными уступами, ограничивающими грабенообразные прогибы и сопряженные с ними выступы. Крупнейшей из морфоструктур является ромбовидная котловина Стеллера, прилегающая к тихоокеанскому склону о. Беринга. Поверхность аккумулятивной равнины в котловине гипсометрически находится на первые сотни метров ниже, чем на прилегающем участке глубоководного желоба, что указывает на ее принадлежность к современному грабену.

У основания тихоокеанского склона Командорского блока к западу от котловины Стеллера в рельефе дна отчетливо выделяется узкое линейное поднятие с асимметричным поперечным профилем, которое прослеживается в северо-западном направлении до склона п-ова Камчатский, ограничивая с севера Курило-Камчатский желоб.

Между восточным склоном п-ова Камчатский и Командорским блоком Алеутского хребта заключена котловина Камчатского пролива. Как со стороны Тихого океана, так и со стороны Берингова моря котловина ограничена крутыми линейными уступами северо-западного простирания, возвышающимися над дном котловины иногда более чем на 1000 м (разломы Стеллера и Беринга). Дно котловины представляет собой плоскую аккумулятивную равнину с глубинами 4300–4400 м, что на 700–900 м ниже гипсометрического уровня современной аккумулятивной равнины на прилегающих участках Командорской котловины.

Котловина Камчатского пролива – район сочленения структур Алеутского хребта с континентальным склоном Восточной Камчатки. Отроги Командорско-Алеутского хребта здесь погружаются в северо-западном направлении под поверхность аккумулятивной равнины, однако в рельефе фундамента и структуре осадочного чехла они непрерывно прослеживаются до подводного склона п-ова Камчатский, где сочленяются с континентальным склоном Восточной Камчатки в районе мыса Африка.

Командорская котловина является одной из трех глубоководных котловин Берингова моря. От двух других котловин – Алеутской и Бауэрс – она отличается рядом геолого-геофизических характеристик, свидетельствующих о ее более молодом возрасте. С северо-запада Командорская котловина ограничена континентальным склоном Восточной Камчатки, с юго-запада – морфоструктурами западного окончания Алеутской дуги, с востока – подводным хребтом Ширшова.

Сейсмически активными являются “транскомандорские” линеаменты Командорской котловины, представленные линейными аномальными зонами северо-западного простирания – “транскомандорские” линеаменты Беринга, Альфа, Гамма и Дельта, а также поднятия и прогибы, вытянутые в этом же направлении<sup>1</sup>. Названные линеаменты прослеживаются через всю котловину от склона Восточной Камчатки до подводного хр. Ширшова. Значительные по протяженности участки этих линеаментов, отчетливо выраженные в рельефе дна, соответствуют зонам тектонических нарушений – разломам, контролирующим не только развитие Командорской котловины, но и современную сейсмотектоническую активность.

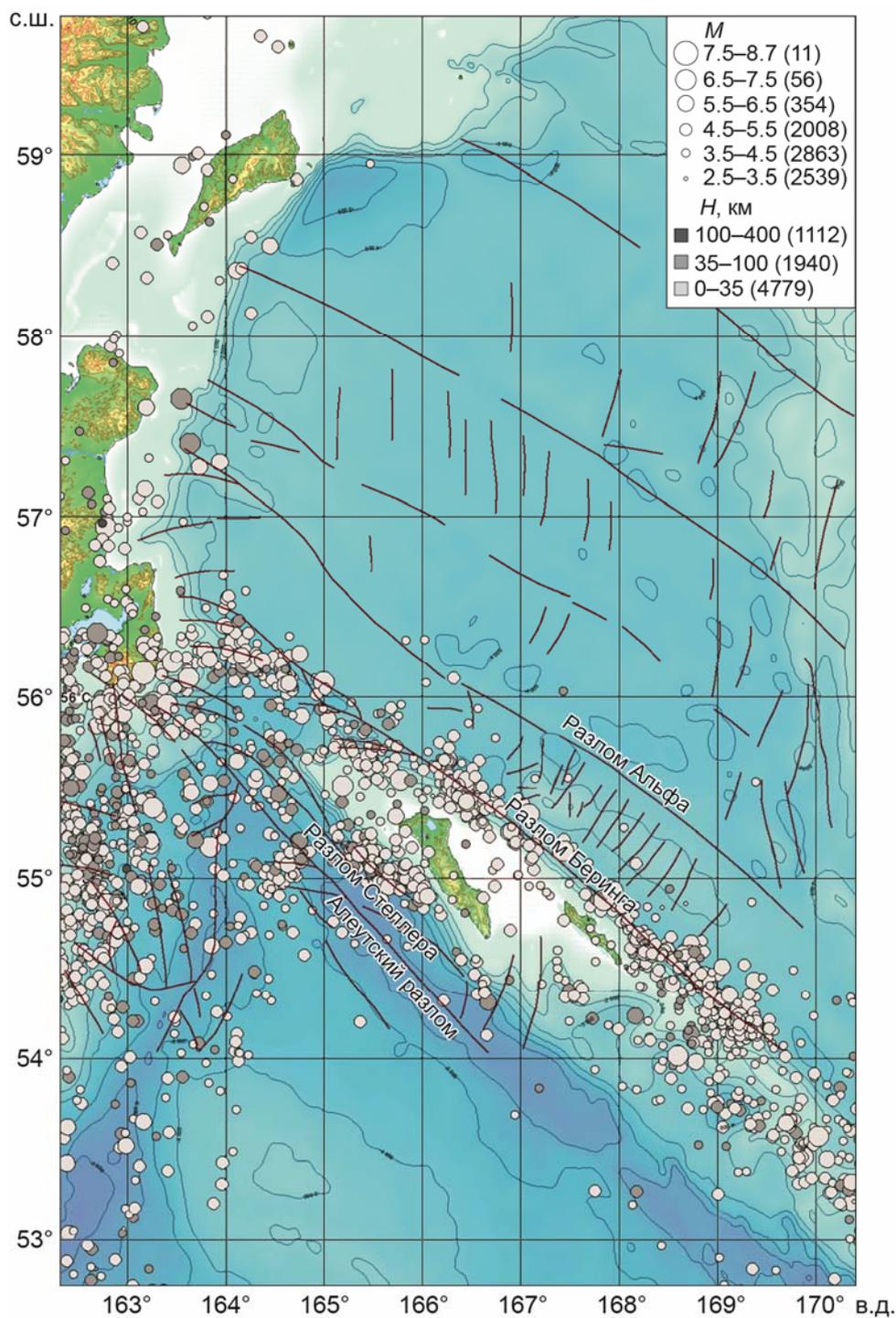
Граница между Командорским блоком и Командорской котловиной проходит по разлому Беринга, который на всем своем протяжении отчетливо выражен в рельефе дна.

На акватории Камчатского пролива разлом Беринга представлен глубоким трогом и линейным уступом северо-западного простирания, ограничивающим с северо-востока котловину Камчатского пролива. Разлом завершается в районе подводного продолжения мыса Африка на континентальном склоне Восточной Камчатки, расчленяя его серией уступов субширотного простирания.

На расстоянии 60–70 км к северу от разлома Беринга в рельефе дна отчетливо проявлен разлом Альфа, ориентированный субпараллельно разлому Беринга и простирающийся от п-ова Озерной на Камчатке до южного окончания хр. Ширшова. Наиболее ярко в рельефе дна выражена северо-западная часть этого разлома, ответвляющаяся от п-ова Озерной в виде узкого поднятия протяженностью ~100 км.

Отражающие блоковую структуру земной коры исследуемого региона разрывные нарушения, выделенные по морфологическим признакам, а именно, по линейным зонам максимальных градиентов в рельефе дна и морфологии отражающих границ, схематически показаны на рис. 3. На схему нанесены эпицентры землетрясений, которые, согласно каталогу *NEIS*, произошли в регионе в 1908–2017 гг.

<sup>1</sup> У восточного окончания одного из поднятий, расположенного южнее линеамента Гамма пробурена скв. 191 [*Селиверстов*, 1998].



**Рис. 3.** Схема разрывных нарушений по [Селиверстов, 2009, 2013] с нанесенными эпицентрами землетрясений с  $M=4.5-7.5$ , произошедших в исследуемом регионе по данным каталога *NEIC* в 1908–2017 гг.

**Fig. 3.** Scheme of faults (by [Seliverstov, 2009, 2013]) with epicenters of earthquakes with  $M=4.5-7.5$ , that occurred in the study region according to the *NEIC* catalog in 1908–2017

### Сейсмическая активность исследуемого региона

Сейсмическая активность исследуемой территории за 2017–2018 гг. рассматривалась на уровне региональных землетрясений с использованием данных Камчатского филиала ФИЦ ЕГС; для длительного периода инструментальных наблюдений 1908–2018 гг. использовались данные каталога *NEIC*.

Как можно видеть на рис. 3, эпицентры землетрясений распределены неравномерно. Сейсмические события концентрируются в отдельные группы, приуроченные, в основном, к разлому Беринга, который отделяет Командорский блок от Командорской котловины Берингова моря. Вдоль разлома от хр. Бауэрс на юго-востоке в направлении на северо-запад до п-ова Камчатский, мыса Африка и мыса Камчатский можно выделить ряд групп землетрясений, в которые входят сильные события, в том числе произошедшие в 2017–2018 гг.

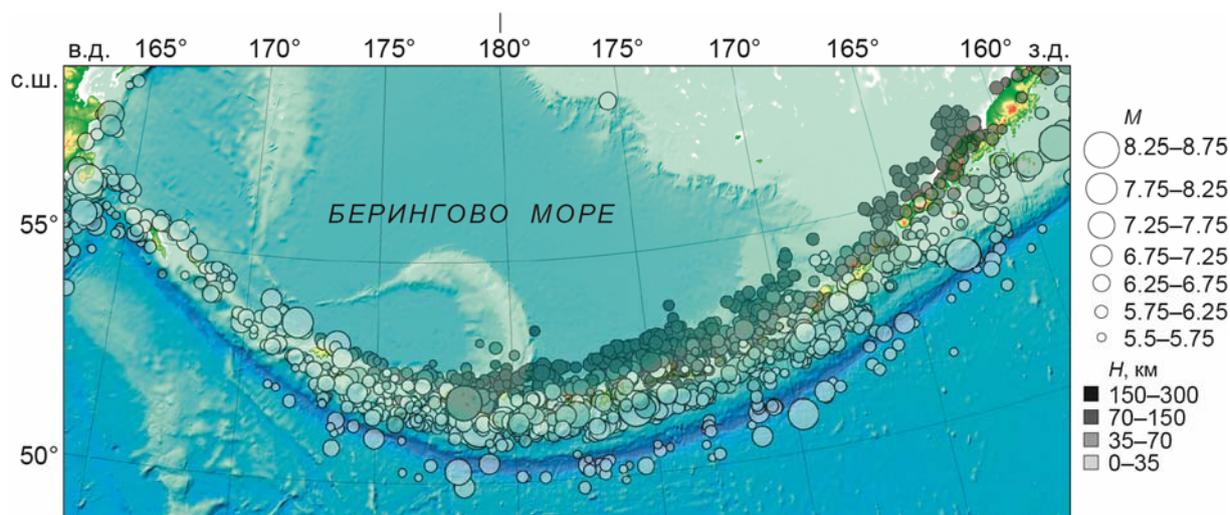
Активизация на этом участке началась в 2017 г., когда в районе Ближних островов 02.06.2017 г. произошло землетрясение с  $M_w=6.8$ , афтершоки которого располагались вкост разлома Беринга. Спустя шесть месяцев, 17.07.2017 г., к северо-востоку от о. Медный произошло сильное землетрясение с  $M_w=7.8$ , предваряемое форшоками и сопровождаемое афтершоками. Это событие, получившее название Ближне-Алеутского землетрясения [Чебров и др., 2017], вызвало усиление сейсмической активности вдоль всего разлома Беринга, вплоть до северной оконечности о. Беринга, где 25.01.2018 г. произошло следующее сильное событие с  $M=6.5$ . Сведения о главных событиях представлены в табл. 2 (механизмы приведены ниже).

**Таблица 2.** Главные события, произошедшие по данным каталога *NEIC* в 2017–2018 гг.

Время UTC	Широта	Долгота	Глубина очага $H$ , км	Магнитуда $M$	Район
02.06.2017 г., 22:24:47.440	54.0312	170.92	5	6.8	200 км к СЗ от о. Атту, Аляска, США
17.07.2017 г., 11:05:09.060	54.5802	168.648	9	6.3	183 км к ВЮВ от с. Никольское, Россия
17.07.2017 г., 23:34:13.740	54.4434	168.857	10	7.7	202 км к ВЮВ от с. Никольское, Россия
25.01.2018 г., 02:10:34.820	55.5423	166.45	11.15	6.2	48 км ВЮВ от с. Никольское, Россия

К югу и северо-западу от о. Беринга сейсмическая активность также проявляется скоплением эпицентров, приуроченных к выделенным Н.И. Селиверстовым [2009, 2013] разломам и структурам. Землетрясений с глубиной очага более 40 км, связанных с погружающейся Тихоокеанской плитой, нет, т.е. на этом участке Алеутской дуги субдукция не наблюдается.

Распределение эпицентров землетрясений, характеризующих сейсмическую активность вдоль всей Алеутской дуги от Аляски на северо-востоке до пересечения с Курило-Камчатской островной дугой на северо-западе показано на рис. 4. На схеме представлены эпицентры землетрясений, произошедших по данным каталога *NEIC* в 1908–2018 гг.; темным цветом выделены эпицентры событий с  $H > 70$  км.



**Рис. 4.** Распределение вдоль Алеутской островной дуги эпицентров землетрясений, произошедших по данным каталога *NEIC* в 1908–2018 гг.

**Fig. 4.** Distribution of foci of earthquakes along the Aleutian island arc that occurred in 1908–2018 according to the *NEIC* catalog

Неглубокие землетрясения ( $H \leq 50$  км) неравномерно распределены на всем протяжении Алеутской островной дуги вдоль желоба и границы погружающейся Тихоокеанской плиты. Они формируют отдельные группы, приуроченные к тектоническим структурным блокам, разделенным каньонами, прогибами. Блоковость строения дуги и размещения гипоцентров событий отмечены в исследованиях [Geist, Childs, Scholl, 1988; Лобковский и др., 2014]. Характерные для зон субдукции глубокие землетрясения наблюдаются не на всем протяжении дуги – они отсутствуют на ее участке к северо-западу от хр. Бауэрса, западнее Ближних островов. Землетрясения с  $H \leq 50$  км отсутствуют на участке Алеутской островной дуги протяженностью  $\sim 300$  км до ее сочленения с Курило-Камчатской островной дугой (между 162 и 168° в.д.). Отсутствие землетрясений на этом участке различными исследователями объясняется по-разному. Одно из объяснений связывается с наличием огромной сейсмической “бреши” в зоне субдукции, т.е. наличием области затишья, которая считается областью подготовки сильного землетрясения. Существование на рассматриваемом участке сейсмической “бреши” отмечалось исследователями достаточно давно, однако в связи с сильными событиями, произошедшими в этой зоне в последние годы (см. табл. 2), вопрос ее существования снова привлек к себе внимание (см., например, [Чебров и др., 2017; Гордеев и др., 2015; Лутиков и др., 2019]).

Существует и иная точка зрения, объясняющая отсутствие землетрясений тем, что на этом отрезке дуги не происходит погружение Тихоокеанской плиты под Командорский блок, т.е. здесь отсутствует зона субдукции как таковая. Известен ряд характерных признаков существования зон субдукции, которые не обнаруживаются на северо-западном участке Алеутской островодужной системы. К ним можно отнести, например, отсутствие краевого океанического вала и ряда гравиметрических признаков.

Важным признаком современных зон субдукции, по утверждению Н.И. Селиверстова [2009], является наличие гравитационного минимума (в редукции Фая), приуроченного к осевой части глубоководного желоба и несколько смещенного в сторону его внутреннего борта. Такой минимум отчетливо прослеживается для сочленяющихся

Курило-Камчатского и Алеутского желобов [Ушаков и др., 1979; Дубинин, 1987]. Гравитационный минимум смещен в сторону внутреннего борта для Камчатской ветви Курило-Камчатского желоба в среднем на 18–20 км. Однако северное окончание камчатской ветви желоба (севернее структуры п-ова Кроноцкий) существенно отличается от более южных его участков по ряду параметров, в том числе и по величине смещения гравитационного минимума, которое здесь резко возрастает и достигает 75–80 км. Для западного окончания Алеутского желоба смещение гравитационного минимума относительно его осевой зоны существенно меньше, чем для Курило-Камчатского, и не превышает, как правило, 5–10 км, иногда уменьшаясь до нулевых значений. Кроме того, фактически отсутствует явно выраженная зона положительных аномалий Фая, соответствующая краевому океаническому валу и являющаяся неотъемлемой частью “гравитационной триады” классических гравитационных моделей зон субдукции.

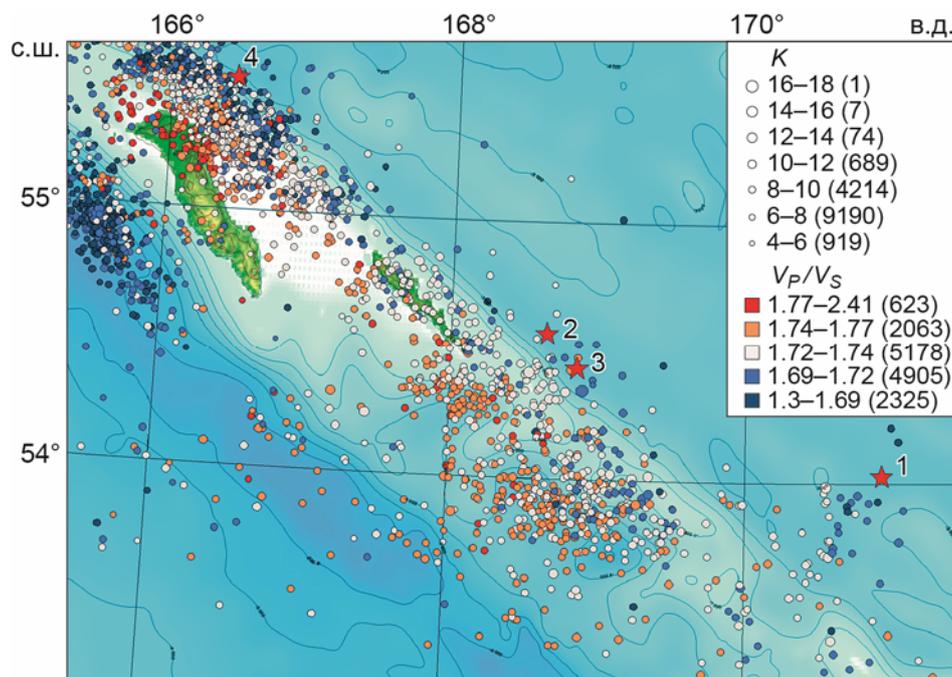
### **Характер поля параметра $V_P/V_S$ вдоль разлома Беринга в области возникновения сильных землетрясений 2017–2018 гг.**

Рассмотрим распределение вдоль разлома Беринга региональных землетрясений, произошедших в регионе в период 2017–2018 гг., используя данные Камчатского филиала ФИЦ ЕГС. На приводимой на рис. 5 схеме эпицентры этих событий отмечены кружками разной окраски в зависимости от соответствующих им значений  $V_P/V_S$ : повышенным значениям ( $V_P/V_S > 1.75$ ) соответствуют кружки с розовой и красной заливкой, пониженным ( $V_P/V_S < 1.68$ ) – с голубой и синей. Диаметр кружков пропорционален классу события  $K$ . Красными звездами на схеме отмечены эпицентры упоминаемых выше четырех сильных событий, произошедших, в рассматриваемый период в Командорском блоке (согласно каталогу *NEIC*, рядом со звездами указаны даты и время событий). Можно видеть, что вдоль северо-восточного борта разлома Беринга, обращенного в сторону Командорской котловины, размещаются землетрясения с пониженными значениями  $V_P/V_S \leq 1.6$ , в то время как, к его юго-западному борту приурочены землетрясения с повышенными значениями  $V_P/V_S > 1.75$ .

Высказывая свое мнение о характере смещений вдоль разлома Беринга, Н.И. Селиверстов утверждает, что по данным НСП форма прогибов и соотношение с магистральными структурами свидетельствуют об их принадлежности к правосторонней сдвиговой зоне, ориентированной вдоль западного сектора Алеутской островной дуги [Селиверстов, 1998, 2009].

По мнению Н.И. Селиверстова [1998, 2009] и других исследователей [Woodcock, Fischer, 1986], имеющие место прогибы по морфологическим и структурным признакам являются типичными “дуплексами растяжения” зон сдвиговых дислокаций. По нашему мнению, описанное выше распределение значений поля параметра  $V_P/V_S$  (см. рис. 5) также может свидетельствовать о напряжениях, характерных для зоны сдвиговых дислокаций вдоль разлома

К юго-западу от о. Беринга наблюдается приуроченная к его шельфовой зоне группа землетрясений с пониженными значениями параметра  $V_P/V_S$ . Сейсмическая активность в этой группе отмечается в течение длительного времени, и, вероятно, она приурочена к структуре, испытывающей тектоническое движение стабильной направленности. Принадлежность этого структурного образования будет рассмотрена нами ниже при описании разрезов, построенных в исследуемом регионе, в том числе проходящих вкост островной дуги.

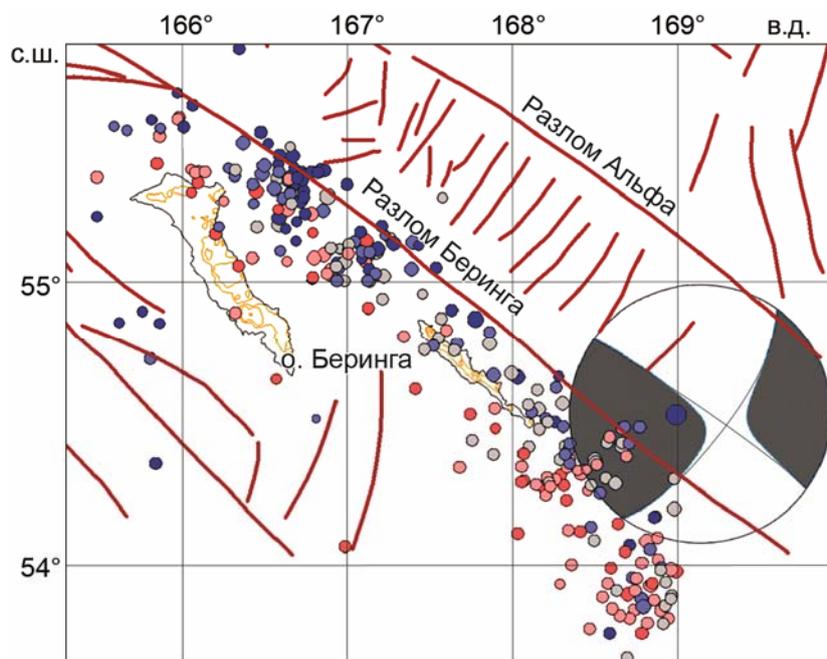


**Рис. 5.** Распределение вдоль разлома Беринга региональных сейсмических событий, произошедших в районе Командорского блока в 2017–2018 гг. Кружки – эпицентры событий по данным КФ ФИЦ ЕГС; цвет кружка отображает значение параметра  $V_p/V_s$ , диаметр – энергетический класс события  $K$  (см. легенду на врезке). Звезды – эпицентры четырех сильных землетрясений по данным каталога *NEIC*: 1 – 02.06.2017 г. (22:24:47.44); 2 – 17.07.2017 г. (11:05:09.06); 3 – 17.07.2017 г. (23:34:13.74); 4 – 25.01.2018 г. (02:19:34.82)

**Fig. 5.** Distribution of regional seismic events that occurred along the Bering fault in the area of the Commander block in 2017–2018. Circles are the epicenters of events according to the data of KB FRC UGS; the color of the circle displays the value of the parameter  $V_p/V_s$ , the diameter indicates the energy class of the event  $K$  (see the legend in the sidebar). Stars are the epicenters of four strong earthquakes according to the *NEIC* catalog: 1 – 02.06.2017 (22:24:47.44); 2 – 17.07.2017 (11:05:09.06); 3 – 17.07.2017 (23:34:13.74); 4 – 25.01.2018 (02:19:34.82)

О поле напряжений в рассматриваемом сегменте Алеутской дуги можно судить также по механизмам очагов. Механизмы очагов сильных землетрясений вдоль всей Алеутской дуги рассматривались, в частности, Л.М. Балакиной [Балакина, Москвина, 2010]. Следует заметить, что механизм очага сильного события характеризует подвижку в конкретной области, а именно в очаге этого события, в то время как значения  $V_p/V_s$  зависят от величины и направленности среднего напряжения, с которым связано закрытие и открытие трещин (землетрясений) за длительный период времени. Согласно теории лавинно-неустойчивого трещинообразования, трещины закрываются в области подготовки очага сильного землетрясения на стадии формирования области сдвига. Механизм очага землетрясения содержит информацию о локальной зоне сдвига, а не об области подготовки, тогда как параметр  $V_p/V_s$  характеризует всю область, а не только зону подготовки землетрясения, которая в зависимости от магнитуды события может быть более 50–100 км [Гарагаш, Хайдаров, 1989].

Наиболее сильным событием на рассматриваемом участке было землетрясение 17.07.2017 г. ( $M_w=7.8$ ), названное Ближне-Алеутским [Lay et al., 2017; Чебров и др., 2019], произошедшее на разломе Беринга к северо-востоку от о. Медный, возможно, на структуре, называемой Южно-Командорским поднятием, отмечаемым на разрезах НСП. На рис. 6 показано размещение вдоль разлома Беринга эпицентров землетрясений



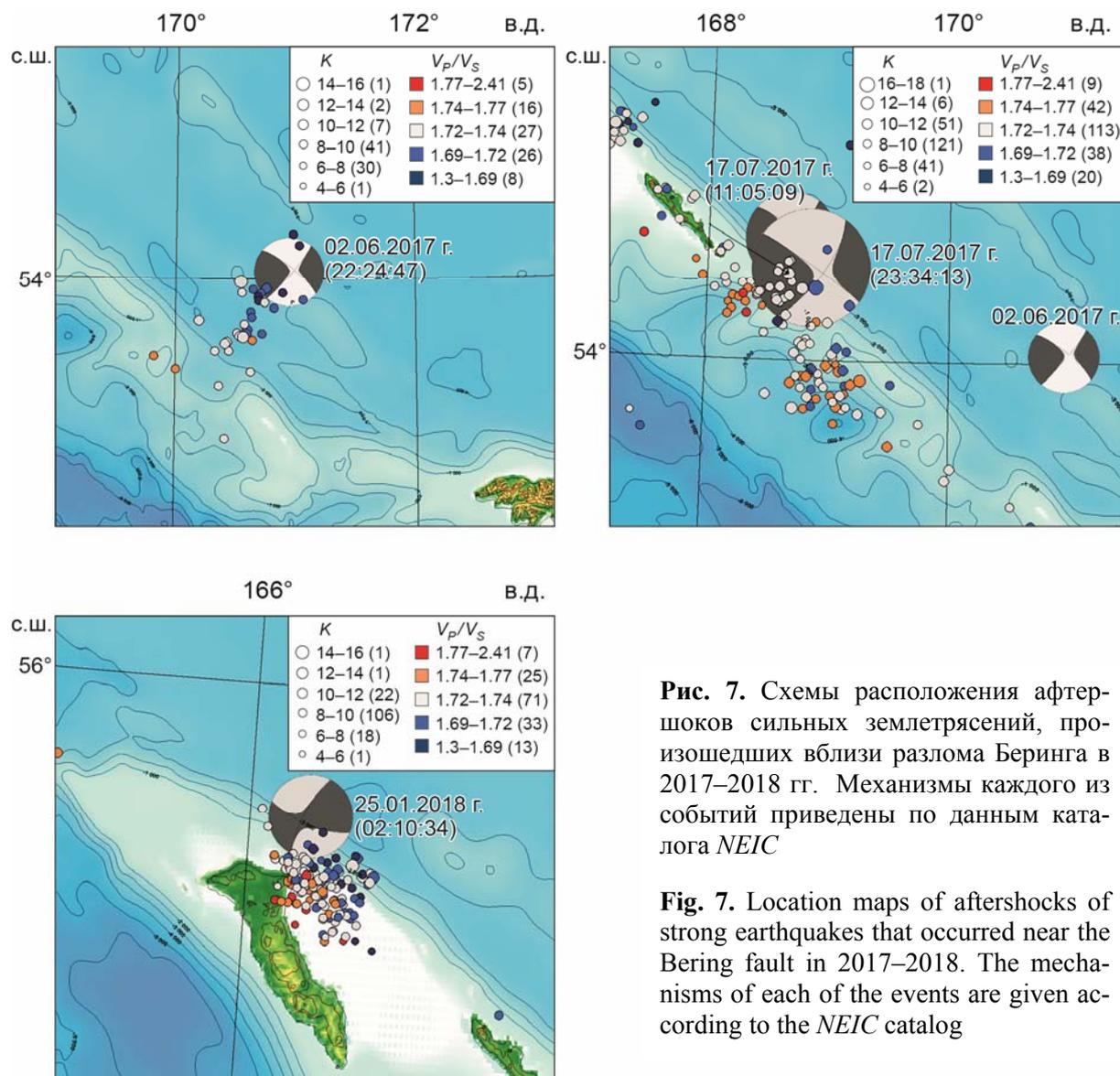
**Рис. 6.** Схема распределения вдоль разлома Беринга землетрясений, произошедших по данным Камчатского филиала ФИЦ ЕГС за период с 17.07.2017 г. по 03.2018 г. Эпицентры серого цвета –  $V_p/V_s=1.72-1.74$ ; оттенки красного –  $V_p/V_s>1.74$ ; оттенки синего –  $V_p/V_s<1.72$ . Положение разломов показано по [Селиверстов, 2009]. Механизм Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. ( $M_w=7.8$ ) приведен по данным каталога *NEIC*

**Fig. 6.** Distribution of earthquakes that occurred along the Bering fault according to the data of the Kamchatka branch of FRC UGS for the period from 17.07.2017 to 03.2018. Epicenters of gray color –  $V_p/V_s=1.72-1.74$ ; shades of red –  $V_p/V_s>1.74$ ; shades of blue –  $V_p/V_s<1.72$ . The location of the faults is shown according to [Seliverstov, 2009]. The mechanism of the Near Aleutian earthquake of 17.07.2017 ( $M_w=7.8$ ) is given according to the *NEIC* catalog

в период развития афтершоковой активности этого землетрясения. На схеме представлен также механизм главного толчка Ближне-Алеутского землетрясения, приводимый по данным каталога *NEIC*. Механизм Ближне-Алеутского землетрясения сдвиговый, что не типично для зон субдукции, для которых характерны сбросы или взбросы. По нашим представлениям, подвижка в очаге этого землетрясения произошла по плоскости перпендикулярной разлому Беринга, что отражается в расположении афтершоков первых часов и суток.

Сейсмическая активизация, возникшая после сильного события, наблюдается вдоль всего разлома Беринга, что свидетельствует о возбуждении сейсмической активности соседних блоков. Это же явление отмечали другие исследователи сейсмической активности Алеутской дуги (см., например, [Лобковский и др., 2014; Geist, Childs, Scholl, 1998]). На схеме, приводимой на рис. 6, хорошо видно, что значения  $V_p/V_s$  разделены плоскостью разлома: на его северо-восточном борту отмечаются пониженные значения параметра, на юго-западном – повышенные. Такое распределение поля  $V_p/V_s$  свидетельствует о дислокациях, характерных для сдвига.

Как отмечалось выше, активизация Командорского блока Алеутского хребта началась ранее, чем произошло Ближне-Алеутское землетрясение. На рис. 7 приводятся схемы расположения сильных событий, произошедших вблизи разлома Беринга, и их афтершоков; механизмы каждого из сильных землетрясений приводятся по данным каталога *NEIC*.



**Рис. 7.** Схемы расположения афтершоков сильных землетрясений, произошедших вблизи разлома Беринга в 2017–2018 гг. Механизмы каждого из событий приведены по данным каталога *NEIC*

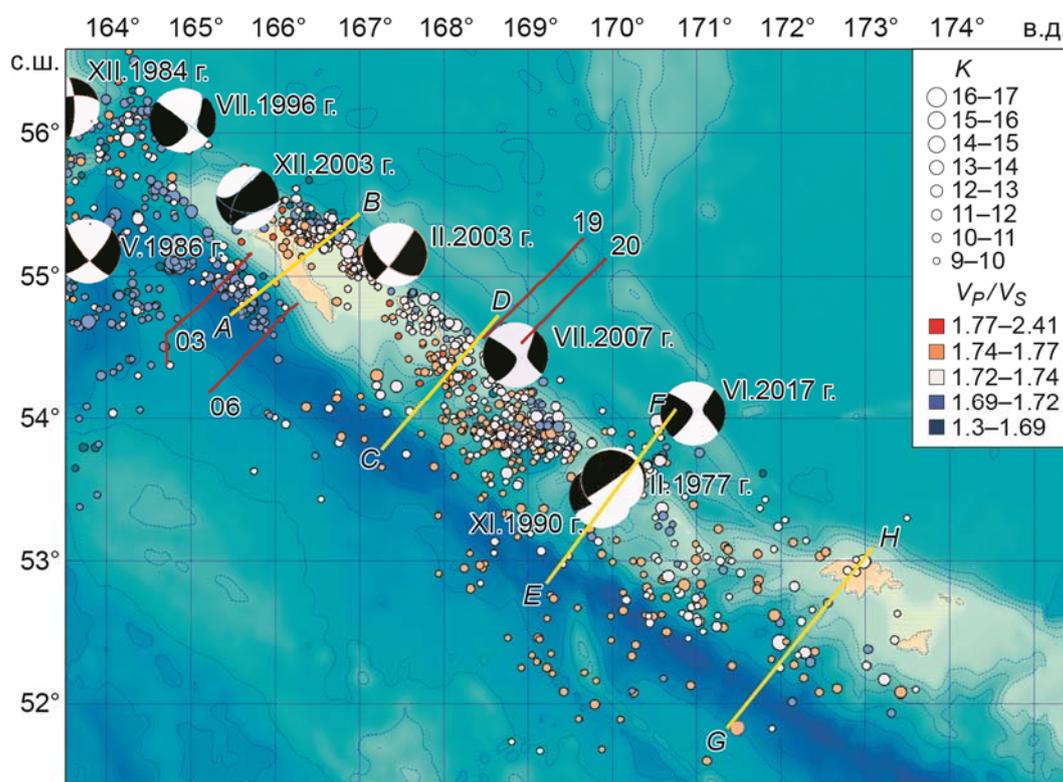
**Fig. 7.** Location maps of aftershocks of strong earthquakes that occurred near the Bering fault in 2017–2018. The mechanisms of each of the events are given according to the *NEIC* catalog

Первое из сильных землетрясений, представленных на рис. 7, произошло 02.06.2017 г. ( $M=6.8$ ) на разломе Беринга в районе Ближних Алеутских островов к востоку от о. Медный (рис. 7, *вверху слева*). Региональных землетрясений, зарегистрированных сетью станций Камчатского филиала, в этой зоне немного, поскольку она слишком удалена от сети КФ ФИЦ ЕГС. Тем не менее, можно видеть, что афтершоки этого события сохраняют ту же закономерность в распределении повышенных и пониженных значений параметра  $V_p/V_s$  относительно разлома Беринга. Механизм землетрясения также относится к сдвиговым.

Следующим по времени сильным событием в исследуемом сегменте Командорского блока стало описанное выше Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. ( $M_w=7.8$ ). На рис. 7, *вверху справа* приведена схема расположения эпицентров его афтершоков, произошедших в первые часы и сутки после главного толчка. Распределение параметра  $V_p/V_s$ , наблюдаемое вдоль разлома Беринга в период с 17.07.2017 по 25.01.2018 гг. (см. рис. 6), согласуется с закономерностями, приведенными выше: пониженные значения расположены по северо-восточному борту разлома, повышенные – по юго-западному.

Последнее по времени из рассмотренных нами сильных событий произошло 25.01.2018 г. ( $M_w=6.2$ ) вблизи северо-западной оконечности о. Беринга (рис. 7, внизу). По данным каталога *NEIC*, механизм землетрясения относится к сдвиговым. Афтершоки этого события располагаются вкрест разлому Беринга. В распределении повышенных и пониженных значений  $V_p/V_s$  сохраняется закономерность, отмеченная выше для предшествующих сильных событий. Следует отметить, что сейсмическая активность и группируемость землетрясений с пониженными значениями  $V_p/V_s$  в этой структуре наблюдались около полугода после сильного события 17.07.2017 г. ( $M_w=7.8$ ).

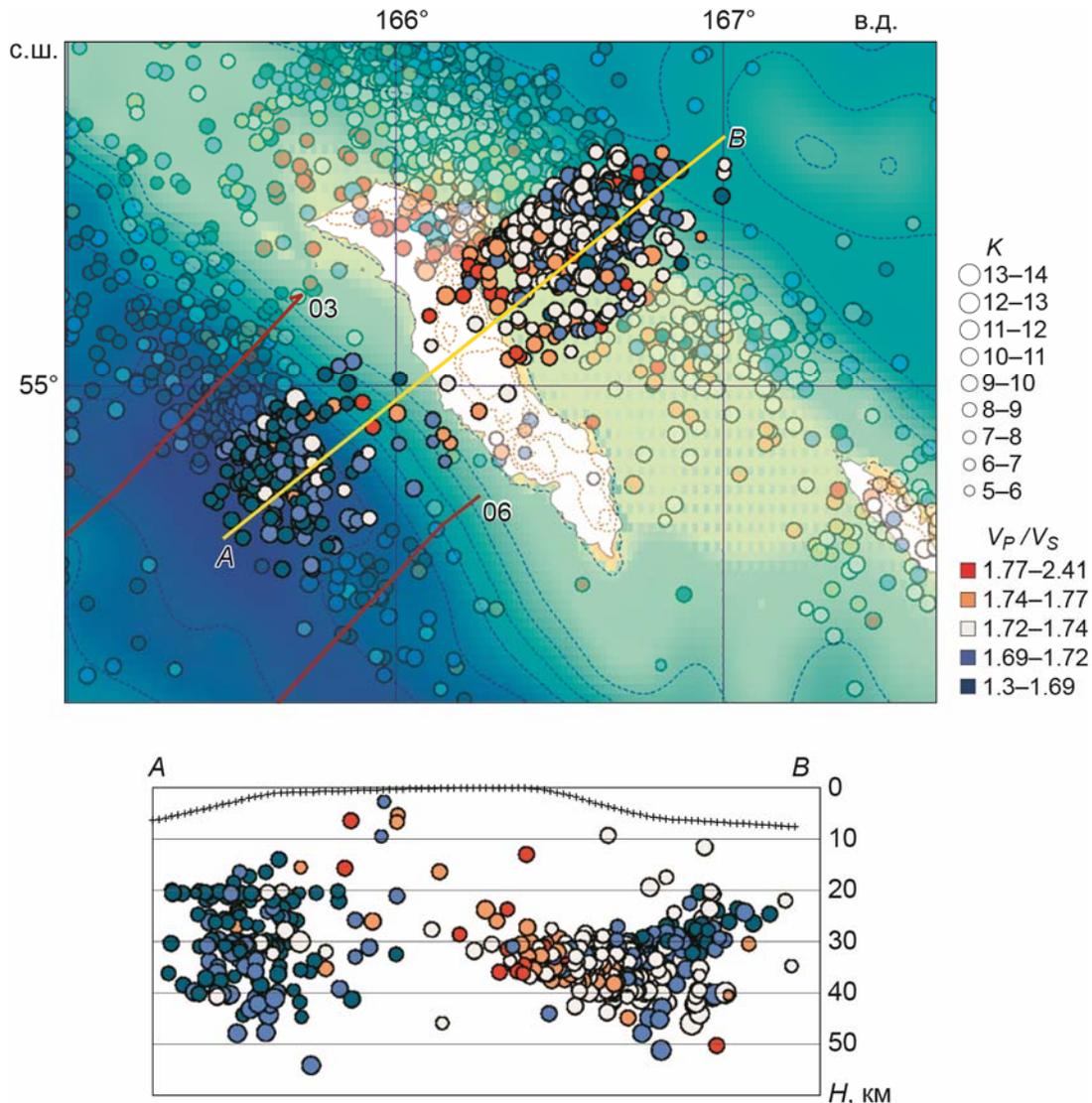
Далее будет рассмотрена серия разрезов по параметру  $V_p/V_s$ , построенных в областях возникновения сильных событий 02.06.2017 г., 17.07.2017 г., 25.02.2018 г. по четырем линиям, проходящим вкрест разлома Беринга. На разрезы вынесены гипоцентры землетрясений из области шириной ~50 км с окраской, отображающей значение  $V_p/V_s$ . Положение линий *AB*, *CD*, *EF*, *GH* показано на рис. 8. На приводимой схеме для обоснования выбора плоскостей разрезов приведены механизмы сильных событий, имевших место на этом участке Командорского блока по данным каталога *NEIC*.



**Рис. 8.** Распределения эпицентров землетрясений вдоль разлома Беринга и положение пересекающих его линий *AB*, *CD*, *EF*, *GH* (желтые прямые), по которым построены рассматриваемые ниже разрезы по параметру  $V_p/V_s$ . Раскраска эпицентров здесь и далее соответствует приводимой легенде. 03, 06, 19, 20 – линии профилей НСП, с которыми выполнялось сопоставление разрезов по параметру  $V_p/V_s$

**Fig. 8.** Distributions of earthquake foci along the Bering fault and the position of the lines *AB*, *CD*, *EF*, *GH* (yellow lines), that are used to construct the  $V_p/V_s$  parameter cross-sections considered below. The coloring of the epicenters hereinafter corresponds to the legend. 03, 06, 19, 20 are lines of the continuous seismic profiles that were compared with the  $V_p/V_s$  parameter cross-sections

На разрезе по линии *AB* (рис. 9, *внизу*) прослеживается наклоненная под углом  $\sim 45^\circ$  к юго-востоку плоскость разлома Беринга, погружающаяся под Командорскую котловину.

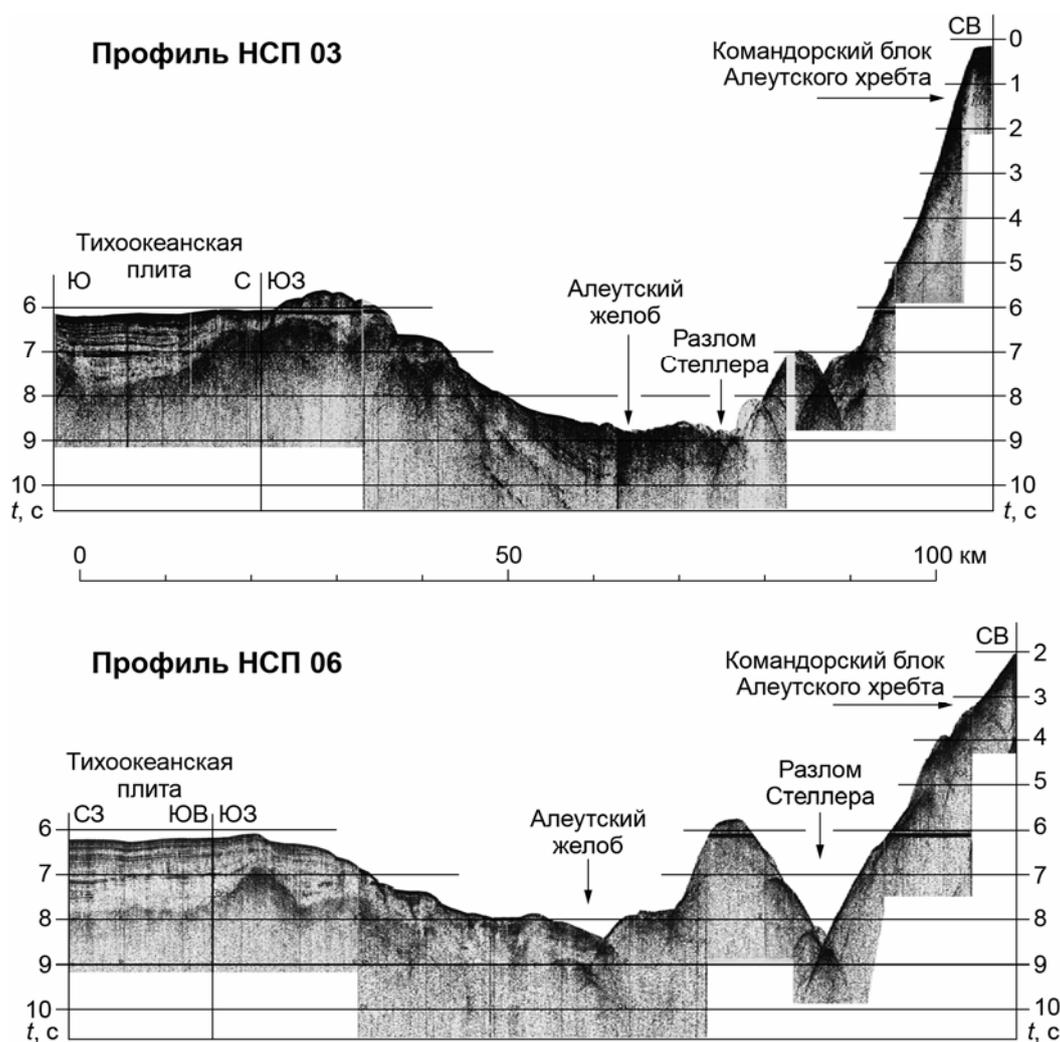


**Рис. 9.** *Внизу*: разрез по параметру  $V_p/V_s$ , построенный по линии *AB*, проходящей вкrest шельфовой зоны о. Беринга; *вверху*: распределение эпицентров землетрясений в прилегающей к линии *AB* полосе шириной 50 км

**Fig. 9.** *Below*: the parameter  $V_p/V_s$  cross-section constructed along the *AB* line, running across the shelf zone of Bering Island; *above*: distribution of earthquake foci in a 50 km wide band adjacent to the *AB* line

Пониженные значения  $V_p/V_s$  концентрируются на северо-восточном борту разлома; повышенные – на юго-западном (см. рис. 9, *вверху*). По глубине гипоцентры землетрясений распределены до  $\sim 50$  км (см. рис. 9, *внизу*).

Обращает на себя внимание устойчивая группа землетрясений с пониженными значениями  $V_p/V_s$ , расположенная к юго-западу от о. Беринга на глубинах примерно от 20 до 50 км. Ниже рассмотрим ее положение в сопоставлении с тектоническими структурами, выявленными методом НСП (рис. 10).



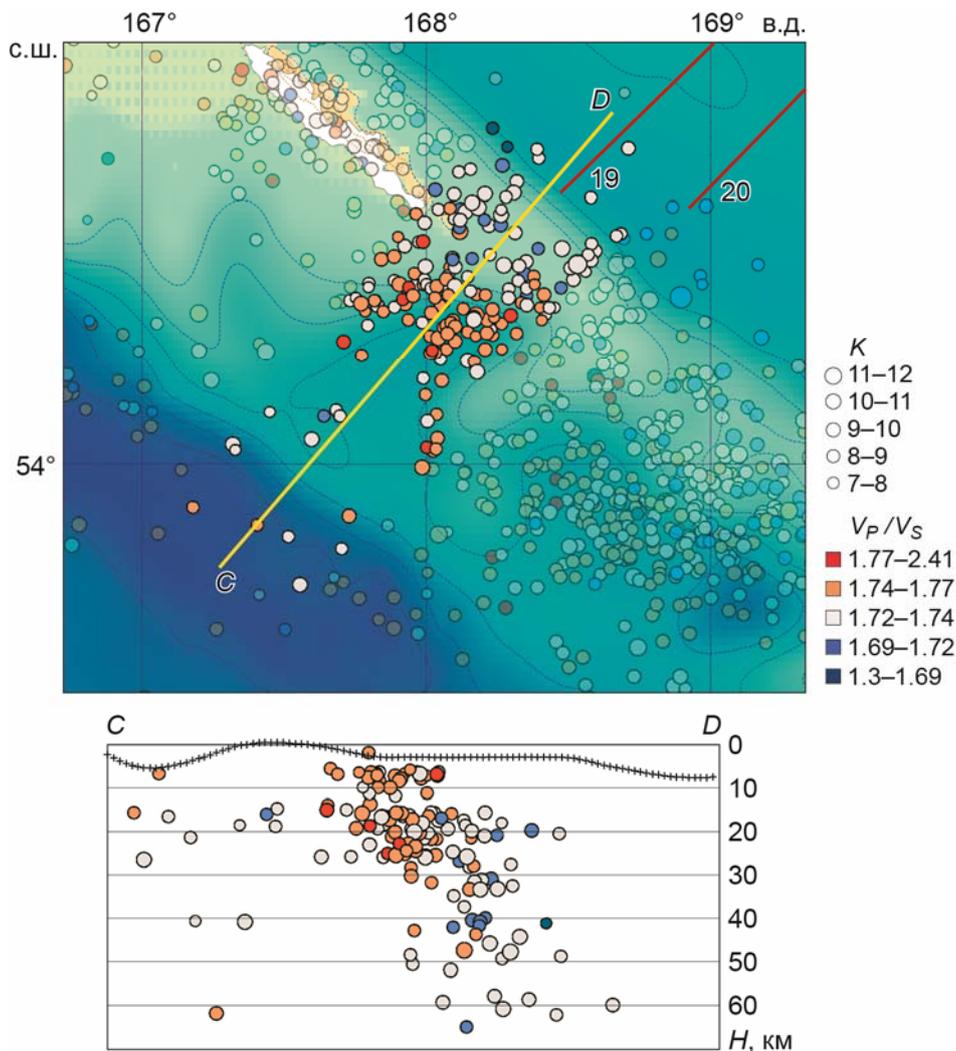
**Рис. 10.** Акустические разрезы, построенные методом НСП по профилям 03 (вверху) и 06 (внизу), пересекающим Алеутский желоб и разлом Стеллера. Направление профилей (Тихоокеанская плита – Алеутский желоб – Командорский блок – шельф о. Беринга) совпадает с направлением линии *AB*, по которой построен разрез на рис. 9, *внизу*. Положение профилей см. на рис. 8

**Fig. 10.** Acoustic cross-sections constructed by the continuous seismic profiling for profiles 03 (*above*) and 06 (*below*), intersecting the Aleutian Trench and the Steller Fault. The direction of the profiles (Pacific Plate – Aleutian Trench – Commander Block – Shelf of Bering Island) coincides with the direction of the *AB* line, along which the cross-section in Fig. 9, *below* is constructed. The position of the profiles see in Fig. 8

Разрез по параметру  $V_p/V_s$  (см. рис. 9, *внизу*) проходит по направлению юго-запад–северо-восток от начальной точки *A* с координатами  $54.5^\circ$  с.ш.,  $165.5^\circ$  в.д. до конечной точки *B* с координатами  $55.5^\circ$  с.ш.,  $166.8^\circ$  в.д. Акустические разрезы, представленные на рис. 10, построены по профилям 06 и 03, пересекающим Алеутский желоб и разлом Стеллера по направлению, совпадающему с направлением линии *AB*, что дает нам возможность сопоставить приводимые разрезы и провести интерпретацию приуроченности особенностей поля скорости  $V_p/V_s$  к сеймотектоническим структурам, которые мы видим на разрезах НСП.

Вероятно, наблюдаемая концентрация группирующихся очагов землетрясений с пониженными значениями параметра  $V_P/V_S$  к юго-западу от о. Беринга может быть ассоциирована с тектонической структурой, расположенной между Алеутским желобом и воздымающимся Командорским блоком. В этой области, возможно, происходят разнонаправленные движения тектонических структур (подъем и погружение), в связи с чем зона концентрации землетрясений с пониженными значениями  $V_P/V_S$ , претерпевает растяжение. Группируемость землетрясений в этой зоне наблюдается не только в настоящее время, но и в течение достаточно длительного времени (см. рис. 3). Следовательно, можно предположить, что ей свойственна устойчивая направленность сейсмо-тектонической активности, сопровождаемая процессами растяжения, характерными для пониженных значений  $V_P/V_S$ . Сведений о параметре  $V_P/V_S$  за длительный период времени, для которого построена карта эпицентров землетрясений на рис. 3, мы не имеем.

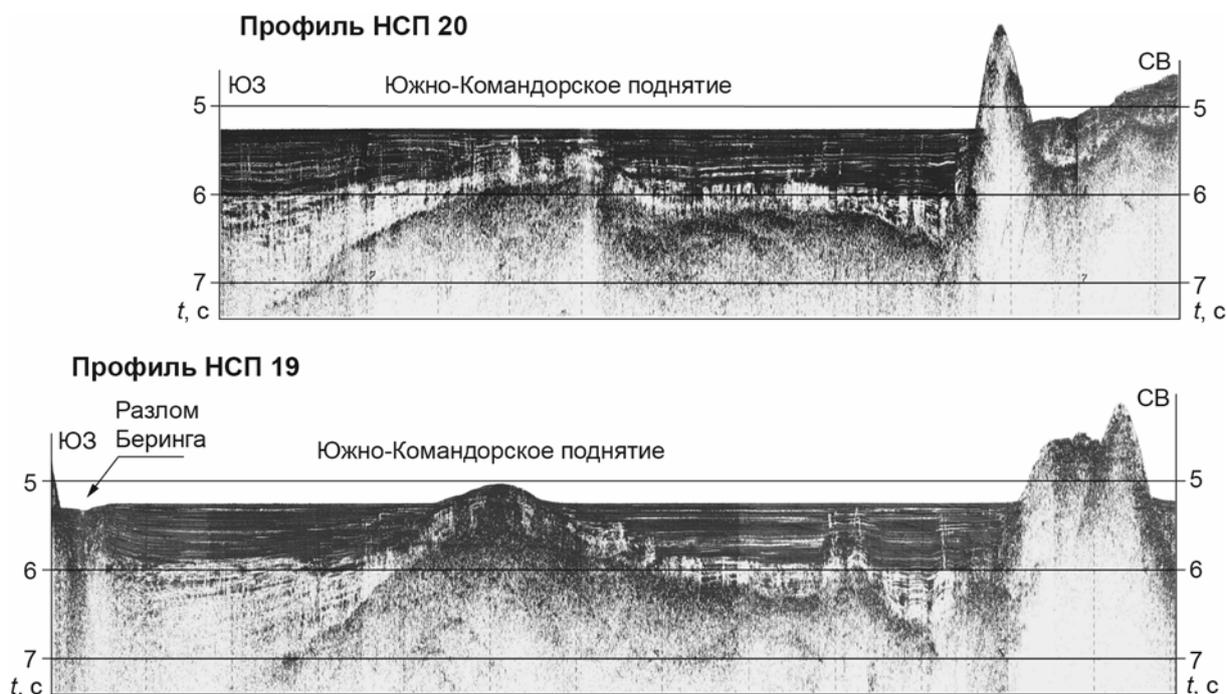
На разрезе по линии  $CD$  (рис. 11, *внизу*) можно видеть плоскость падения разлома Беринга к востоку от о. Медный вблизи эпицентра сильного Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. Надо отметить, что закономерность распределения повышенных и пониженных значений параметра  $V_P/V_S$  сохраняется и в этом случае.



**Рис. 11.** То же, что на рис. 9, представленное для линии  $CD$

**Fig. 11.** The same as in Fig. 9, presented for  $CD$  line

Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. произошло к северо-востоку от о. Медный в зоне погружения разлома Беринга под Командорскую котловину. Вероятно, очаговую область этого события в сеймотектоническом плане можно соотнести со структурой Южно-Командорского поднятия, показанного на разрезах НСП по профилям 20 (рис. 12, *вверху*) и 19 (рис. 12, *внизу*), построенным Н.И. Селиверстовым [2009].

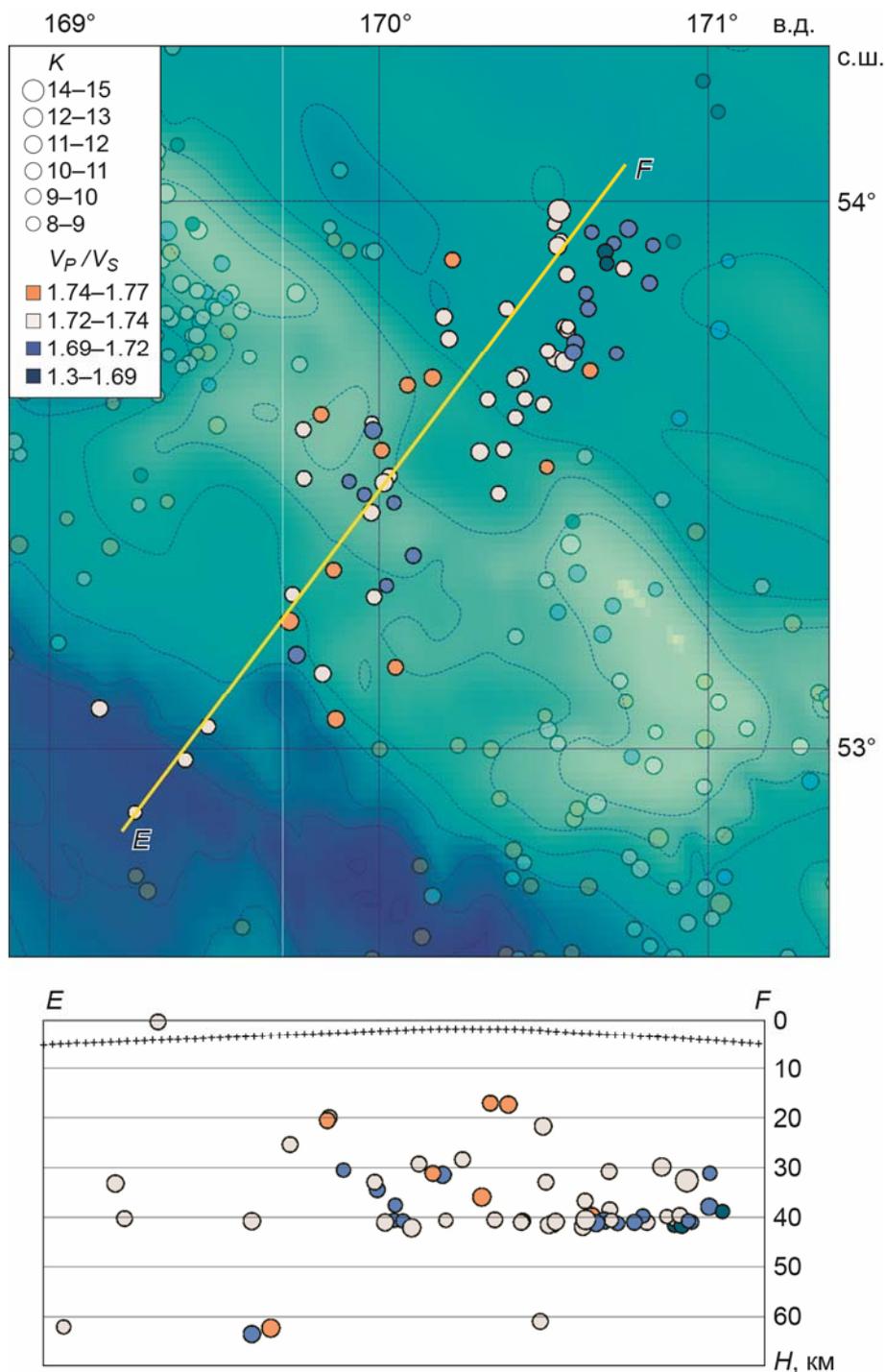


**Рис. 12.** Акустические разрезы, построенные методом НСП по профилям 20 (*вверху*) и 19 (*внизу*), пересекающим разлом Беринга вблизи очаговой области Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. ( $M_w=7.8$ )

**Fig. 12.** Acoustic cross-sections constructed by the continuous seismic profiling for profiles 20 (*above*) and 19 (*below*) intersecting the Bering fault near the focal area of the Near Aleutian earthquake of 17.07.2017 ( $M_w=7.8$ )

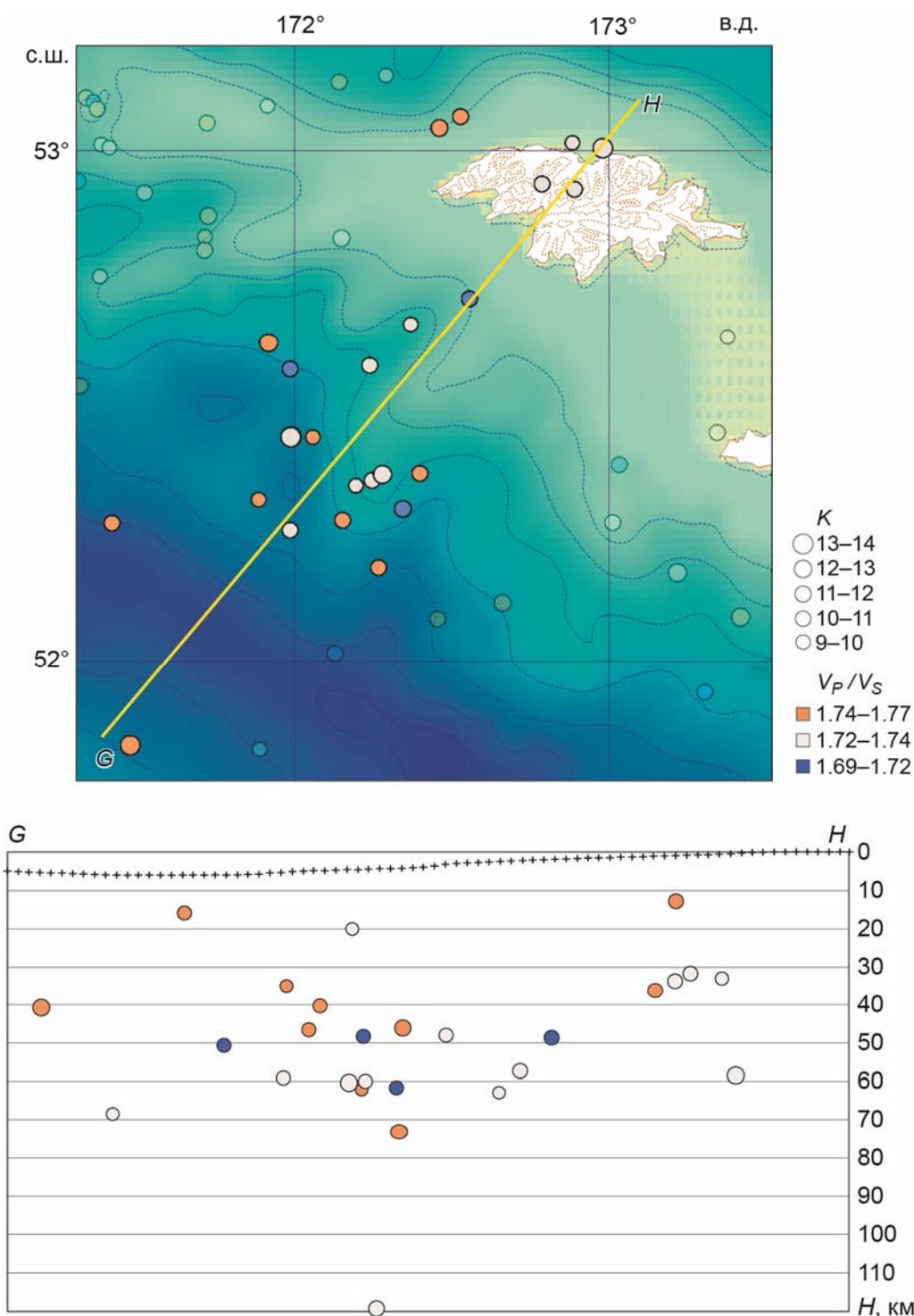
Разрезы по параметру  $V_p/V_s$ , построенные еще по двум линиям  $EF$  и  $GH$ , представлены на рис. 13, 14 (положение линий см. на рис. 8). Первая из них – линия  $EF$  – проходит в области сильного землетрясения 02.06.2017 г. ( $M=6.6$ ). Разрез по параметру  $V_p/V_s$ , построенный вдоль этой линии в области возникновения события, показан на рис. 13, *внизу*; над разрезом (рис. 13, *вверху*) – распределение эпицентров землетрясений, включая афтершоки события. Распределение землетрясений позволяет проследить плоскость разлома Беринга, погружающуюся под Командорскую котловину под углом  $\sim 45\text{--}50^\circ$ . Для северо-восточного склона разлома по-прежнему характерны пониженные значения  $V_p/V_s$ . Землетрясение 02.06.2017 г. имеет механизм сдвигового типа.

На тихоокеанском склоне Командорского блока имели место два сильных землетрясения с механизмами взбросового типа – 06.11.1990 г. ( $M=7.1$ ) и 19.02.1977 г. ( $M=6.7$ ). Такой тип механизма характерен для зон субдукции, в данном случае – для погружающейся Тихоокеанской плиты. Можно предположить, что к юго-востоку от этой зоны вдоль Алеутской дуги характер сейсмичности является типичным для зон субдукции, о чем свидетельствует также появление заглубленных землетрясений с  $H>50\text{--}70$  км (см. рис. 4).



**Рис. 13.** Внизу: разрез по параметру  $V_p/V_s$ , построенный по линии  $EF$ , проходящей вкост разлома Беринга в области сильного землетрясения 02.06.2017 г. (район Ближних Алеутских островов). Вверху: распределение эпицентров землетрясений (включая афтершоки) в прилегающей к линии  $EF$  полосе шириной 50 км. Условные обозначения и положение линии  $EF$  см. на рис. 8

**Fig. 13.** Below: the  $V_p/V_s$  parameter cross-section, constructed along the line  $EF$ , running across the Bering fault in the region of the strong earthquake of 02.06.2017 (the region of the Near Aleutian Islands). Above: distribution of earthquake foci (including aftershocks) in a 50 km wide band adjacent to the  $EF$  line. The legend and the position of the  $EF$  line are shown in Fig. 8



**Рис. 14.** Внизу: разрез по параметру  $V_P/V_S$ , построенный по линии GH, проходящей вкост Алеутской дуги в районе Ближних Алеутских островов. Вверху: распределение эпицентров землетрясений в прилегающей к линии GH полосе шириной 50 км. Условные обозначения и положение линии GH см. на рис. 8

**Fig. 14.** Below: the  $V_P/V_S$  parameter cross-section, constructed along the line GH, running across the Aleutian arc in the region of the Near Aleutian Islands. Above: distribution of earthquake foci in a 50 km wide band adjacent to the GH line. The legend and the position of the GH line are shown in Fig. 8

Из-за большого удаления регистрация региональных землетрясений Камчатской сетью сейсмических станций из этого района ограничена по энергетическому классу, точности определения параметров гипоцентров и  $V_p/V_s$ . Однако, появление глубоких землетрясений и распределение гипоцентров слабых землетрясений в плоскости разреза явно указывают на наличие субдукции Тихоокеанской плиты под блок Ближних островов.

### Обсуждение результатов исследования поля параметра $V_p/V_s$

Исследования распределения кинематического параметра  $V_p/V_s$  в пространстве и времени, проведенные в пределах Командорского блока, показали его информативность для выявления особенностей строения геолого-геофизической среды и ее напряженного состояния.

Исследованное поле распределения кинематического параметра в пределах Командорского блока Алеутско-Командорского хребта на границе с Командорской котловиной, проходящей вдоль разлома Беринга, показало характер дислокаций вдоль него. Кинематика свидетельствует о сдвиговом, дилатансионном процессе вдоль разлома Беринга – одного из самых сейсмоактивных разломов исследуемого региона. Для северо-восточной плоскости разлома, погружающейся под Командорскую котловину, характерны пониженные значения  $V_p/V_s$ . В то же время вдоль юго-западного борта разлома отмечаются повышенные значения, присущие зонам сжатия в поле напряжений. Анализ механизмов очагов сильных землетрясений, имевших место в этом регионе в последние годы, также приводит к выводу, что северо-восточный борт разлома испытывает растяжение.

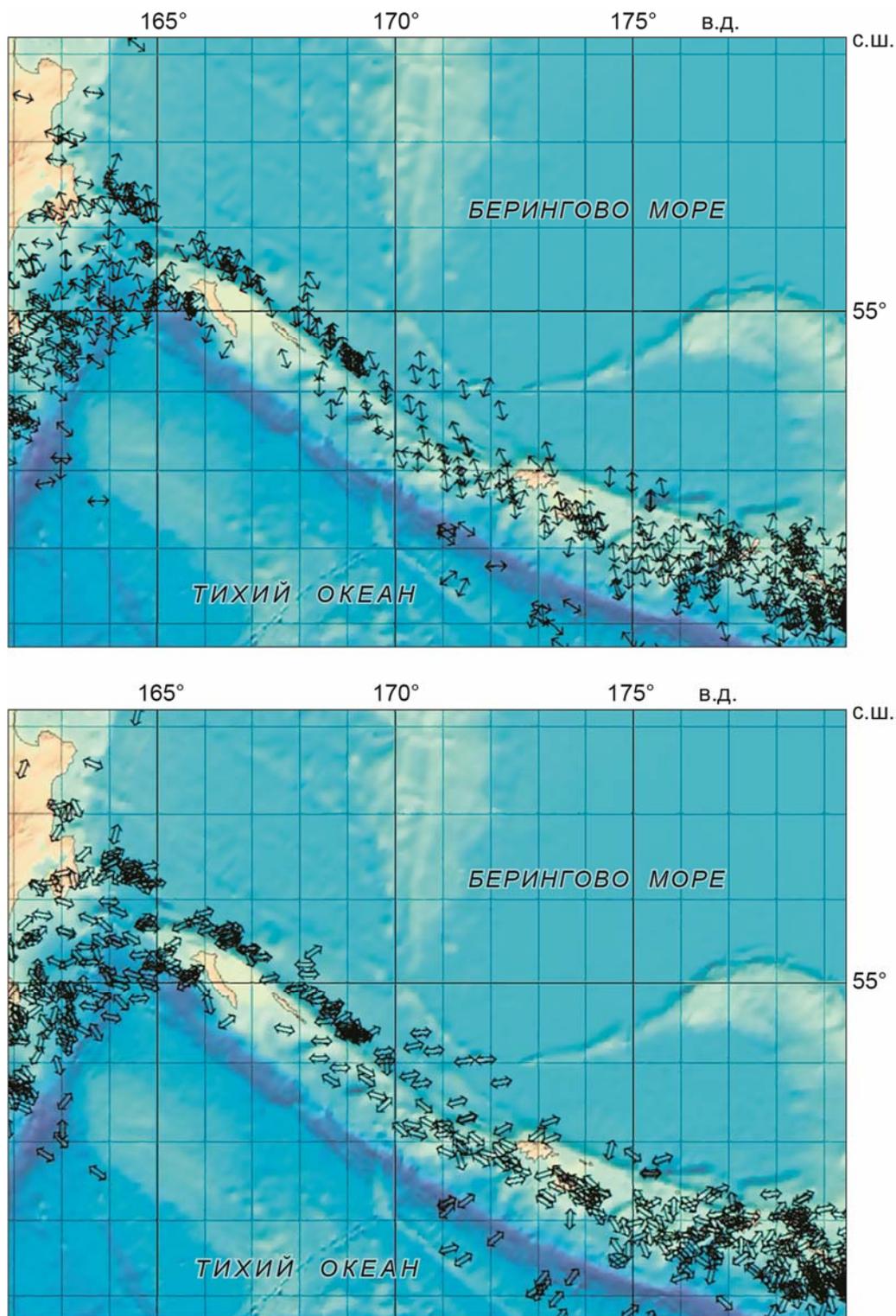
Для сравнения и подтверждения результатов оценки поля напряжений, полученных по кинематическому параметру  $V_p/V_s$ , нами было построено и проанализировано поле напряжений по механизмам очагов землетрясений за длительный период времени по данным *CMT*<sup>1</sup>. Карты расположения осей сжатия и растяжения для исследуемого сегмента Алеутской дуги и зоны ее сочленения с Курило-Камчатской дугой представлены на рис. 15.

Можно видеть, что оси растяжения механизмов очагов землетрясений ориентированы в основном в близширотном направлении, а также с северо-запада на юго-восток вдоль Командорского блока и разлома Беринга. При этом для осей сжатия характерна направленность вкост Командорского блока и разлома, т.е. в направлении юго-запад – северо-восток. Положение осей утрачивает свою упорядоченность только в области сочленения Алеутско-Командорского блока с Камчаткой и к юго-востоку от Ближних Алеутских островов.

Со стороны Курило-Камчатского желоба оси ориентированы в направлении юго-восток – северо-запад и как бы обтекают Тихоокеанскую плиту. Оси сжатия расположены вкост направления желобов. О таком же расположении осей свидетельствует сдвиговый механизм рассмотренных в статье сильных событий.

Представляет интерес возможность оценки строения и напряженного состояния сеймотектонических структур по характеру распределения параметра  $V_p/V_s$ . О возможности такой оценки свидетельствует сопоставление разрезов, построенных по полю значений  $V_p/V_s$ , с акустическими разрезами, полученными при морских работах методом непрерывного сейсмического профилирования (НСП). Так, в шельфовой зоне тихоокеанского склона о. Беринга выявлено образование с характерными пониженными

<sup>1</sup> *The Global Centroid-Moment-Tensor Project (CMT)* (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>).



**Рис. 15.** Оси сжатия (*вверху*) и растяжения (*внизу*) по механизмам землетрясений, произошедших по данным каталога СМТ (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>) в районе сочленения Тихоокеанской плиты с Курило-Камчатской и Алеутской островодужными системами

**Fig. 15.** Axes of compression (*above*) and extension (*below*) by the mechanisms of earthquakes that occurred in the joint area of the Pacific Plate with the Kuril-Kamchatka and Aleutian island-arc systems according to the Harvard CMT catalog (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>)

значениями поля  $V_p/V_s$ . При сопоставлении с акустическими разрезами, построенными по данным НСП, это группированное образование может быть ассоциировано с сейсмотектонической структурой, для которой характерна разнонаправленность движений – воздымание в одном направлении, в сторону Командор, и опускание в другом, в сторону разлома Стеллера и желоба. Таким образом, можно утверждать, что имеет место процесс растяжения, который, видимо, носит долговременный характер.

По размещению и группировке в пространстве аномальных значений параметра  $V_p/V_s$  можно определять особенности поля напряжений для тектонических структур и разломов, оценивать характер дислокаций и тип смещений по ним.

Распределение землетрясений (сейсмической активности) в пределах Командорского блока требует некоторых пояснений. Во-первых, наблюдается четкая приуроченность сейсмической активности к “транскомандорскому” линеamentу – разлому Беринга. Судя по распределению кинематического параметра  $V_p/V_s$  вдоль разлома Беринга, можно предположить, что Тихоокеанская плита и Командорский блок тесно соединены друг с другом (как бы “припаяны”) и совместно испытывают дислокацию сжатия. В то же время, граница Командорского блока и Командорской котловины контролируется разломом Беринга.

Мы видим пониженные значения параметра  $V_p/V_s$ , характерные для дислокаций растяжения, приуроченных к плоскости разлома Беринга, погружающейся под Командорскую котловину. Косвенным подтверждением этому является сдвиговый характер механизмов землетрясений (см. рис. 6, 7). Во-вторых, землетрясения концентрируются в виде отдельных групп, приуроченных к блокам, разделенным прогибами. Однако при возникновении сильного события в одном из блоков сейсмическая активизация наблюдается и в соседних. Этот факт можно проследить по полю  $V_p/V_s$  на рис. 6 в период развития сейсмической активности после землетрясения 17.07.2017 г. с  $M_w=7.8$ . Факт активизации соседних блоков отмечали и другие исследователи [Лобковский и др., 2014; Geist et al., 1988].

Механизмы сильнейших землетрясений, зарегистрированных за период инструментальных наблюдений в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг (см. рис. 2), а также данные о современных движениях земной коры, полученные при проведении GPS-наблюдений [Гордеев и др., 2015], свидетельствуют о соответствии современных горизонтальных тектонических движений новейшим, выявленным по геоморфологическим данным. В частности, выделенная по геоморфологическим данным правосторонняя сдвиговая зона, соответствующая западному сектору Алеутской островной дуги, находит соответствующее отражение не только в современных движениях земной коры и механизмах сильнейших землетрясений, но и в поле параметра  $V_p/V_s$ .

Как отмечалось выше, в исследуемом регионе во время Международного геофизического года были проведены масштабные гравиметрические работы, позволившие выявить характерные особенности поля. Как известно, важная черта современных зон субдукции – наличие гравитационного минимума (в редукции Фая), приуроченного к осевой части глубоководного желоба и несколько смещенного в сторону его внутреннего борта. Для западного окончания Алеутского желоба смещение гравитационного минимума относительно осевой зоны существенно меньше, чем для Курило-Камчатского – как правило, оно не превышает 5–10 км, иногда уменьшаясь до нуля. Кроме того, фактически отсутствует явно выраженная зона положительных аномалий Фая, соответствующая краевому океаническому валу и являющаяся неотъемлемой частью “гравитационной триады” классических гравитационных моделей зон субдукции (сама структура краевого океанического вала, как отмечалось выше, здесь также не выражена).

Указанные особенности гравитационного поля не характерны для зон субдукции, но часто наблюдаются в зонах трансформных разломов [Дубинин, 1987; Ушаков и др., 1979]. Таким образом, наблюдаемая структура аномального гравитационного поля подтверждает предположение о трансформном характере перемещения Тихоокеанской плиты относительно структур западного окончания Алеутской дуги и отсутствию здесь современных геодинамических условий субдукции.

### Заключение

Приведенные результаты анализа поля  $V_p/V_s$  исследуемого Командорского блока Алеутской островной дуги приводят нас к выводу о том, что кинематический параметр  $V_p/V_s$  характеризует упругие и прочностные свойства геофизической среды, отражает характер и изменения поля напряжений. С помощью картирования этого параметра по площади могут быть выявлены глубинные, подчас погребенные, сейсмотектонические структуры.

Наблюдаемые зоны смены знака аномалий, градиентные зоны, вероятнее всего, могут рассматриваться как погребенные тектонические структуры, в том числе и как ступени в фундаменте и верхах мантии с резким перепадом высот [Славина и др., 2017], а также как очаговые зоны возможно готовящихся будущих сильных землетрясений.

Распределение повышенных и пониженных значений параметра  $V_p/V_s$  вдоль разлома Беринга в афтершоковые периоды рассмотренных сильных землетрясений 2017–2018 гг. свидетельствует об устойчивом процессе дилатансионного растяжения как в очаговых зонах, так и вдоль всего разлома в целом.

Установлено, что для северо-восточной плоскости разлома Беринга, погружающейся под Командорскую котловину, характерны пониженные значения  $V_p/V_s$ , в то время как вдоль юго-западного борта разлома отмечаются повышенные значения, характерные для зон сжатия в поле напряжений.

При сопоставлении пространственного распределения значений  $V_p/V_s$  с акустическими разрезами, полученными методом НСП при морских работах, установлено, что области контраста значений  $V_p/V_s$  ассоциируются с сейсмотектоническими структурами, для которых характерна разнонаправленность движений: воздымание в одном направлении (в сторону Командорских островов) и опускание в другом (в сторону разлома Стеллера и желоба). Предполагается, что в этой тектонической области разнонаправленных движений возникает растяжение, в результате чего здесь концентрируются землетрясения с пониженными значениями  $V_p/V_s$ . Тем самым области контраста величин  $V_p/V_s$  могут служить маркирующим признаком, указывающим на характер смещения тектонических структур, в том числе и вдоль разломов, а также на разнонаправленность тектонических движений.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности в дальнейшем при оперативной оценке поля напряжений использовать методику наблюдений за параметром  $V_p/V_s$ , по данным региональной сейсмической активности.

Ранее [Славина и др., 1999] отмечалась приуроченность ряда сильных землетрясений к зонам смены знака аномалий  $V_p/V_s$  (“градиентным” зонам). Инструментально определенный эпицентр землетрясения фактически – это точка начала вспарывания разрыва, а, как показывают экспериментальные работы на образцах и при моделировании [Славина, Тагизаде, Горельчик, 1985; Славина, Горельчик, 1989], вспарывание по уже активизировавшемуся разлому начинается обычно в концевых участках. Таким образом, зоны смены знака и высокого градиента параметра  $V_p/V_s$  как раз и являются концевыми участками активизировавшегося разлома. Эти наблюдения, являющиеся по сути природным

”лабораторным” экспериментом, подтверждают наше утверждение, что отрицательные аномалии параметра  $V_p/V_s$  приурочены к участкам активизации глубинных разломов.

Таким образом, систематическое прослеживание и картирование в пространстве и времени флуктуаций параметра  $V_p/V_s$  позволяет выявлять области с аномалиями разного знака. Построенные по ним зоны перехода между экстремумами отрицательных и положительных аномалий оказываются приуроченными к зонам глубинных разломов. Это обстоятельство открывает возможность использования параметра  $V_p/V_s$  для картирования глубинных разломов.

Активные, оживающие участки разломов характеризуются появлением и накоплением аномалий параметра  $V_p/V_s$  отрицательного знака или высоким градиентом поля при смене знака аномалии.

### Литература

- Балакина Л.М., Москвина А.Г. Особенности сейсмогенного процесса в Алеутской островной дуге. III. Землетрясения в западной и восточной окраинах дуги // Физика Земли. 2010. № 4. С.9–34.
- Гарагаш И.А. О хрупком разрушении упругих тел с большим числом трещин // Механика тектонических процессов. Алма-Ата: Наука, 1983. С.61–74.
- Гарагаш И.А., Хайдаров М.С. Модель развития сейсмического процесса в зоне тектонического разлома перед сильным землетрясением // Сейсмологические исследования. 1989. № 11. С.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.
- Дубинин Е.П. Трансформные разломы океанической литосферы. М.: МГУ, 1987. 181 с.
- Зверев С.М., Капустян Н.К. Сейсмические исследования литосферы Тихого океана. М.: Наука, 1980. 207 с.
- Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтиаров В.Ф., Павлов В.М., Тутков Н.Н. Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С.54–67.
- Лобковский Л.И., Баранов Б.В., Дозорова К.А., Мазова Р.Х., Кисельман Б.А., Баранова Н.А. Командорская сейсмическая брешь: прогноз землетрясения и расчет цунами // Океанология. 2014. Т. 54, № 4. С.561–573.
- Лутиков А.И., Рогожин Е.А., Донцова Г.Ю., Жуковец В.Н. Землетрясение 17.07.2017 г.,  $M_w=7.8$  вблизи Командорских островов и сильные сейсмические проявления в западном сегменте Алеутской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С.52–66.
- Муравьев А.В., Селиверстов Н.И., Смирнов Я.Б., Сугробов В.М. Тепловой поток в районе подводного четвертичного вулканизма Командорской котловины // Докл. АН СССР. 1990. Т. 312, № 2. С.438–443.
- Селиверстов Н.И. Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир, 1998. 164 с.
- Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с.
- Селиверстов Н.И. Подводные морфоструктуры Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский, 2013. 161 с.
- Славина Л.Б., Горельчик В.И. Отражение физических процессов подготовки землетрясений и извержений вулканов в поле времен пробега сейсмических волн // Экспериментальные и численные методы в физике очага землетрясений. М.: Наука, 1989. С.44–53.

- Славина Л.Б., Кузьмина Т.А., Мячкин В.В. К вопросу о времени и месте возникновения кинематических предвестников сильных землетрясений // Модельные и натурные исследования очагов землетрясений. М.: Наука, 1991. С.71–78.
- Славина Л.Б., Тагизаде Т.Т., Горельчик В.И. О возможности выявления зон активизации глубинных разломов по параметру  $V_p/V_s$  // Докл. АН СССР. 1985. Т. 282, № 3. С.550–554.
- Славина Л.Б., Гарагаш И.А., Мячкин В.В., Горельчик В.И., Соловьев Н.В. Изменение напряженно-деформированного состояния и кинематических параметров среды во время Большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 1999. № 1. С.79–86.
- Славина Л.Б., Кучай М.С., Лиходеев Д.В., Абдуллаева Р.Р. Оценка напряженно-деформированного состояния зон сеймотектонической активности по кинематическому параметру  $V_p/V_s$  на примере структур Большого Кавказа, Куринской депрессии, Закавказья и западного Прикаспия // Вопросы инженерной сейсмологии. 2017. Т. 44, № 1. С.31–56.
- Строение земной коры в области перехода от Азиатского континента к Тихому океану. М.: Наука, 1964. 308 с.
- Ушаков С.А., Галушкин Ю.И., Гапоненко Г.И., Дубинин Е.П., Иванов С.С., Иванов О.П., Каверзнев К.М., Шимараев В.Н. Гравитационное поле и рельеф дна океана. Л.: Недра, 1979. 295 с.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В., Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Дрознина С.Я., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Тутков Н.Н. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с  $M_w=7.8$ . Протяженный разрыв вдоль Командорского блока Алеутской островной дуги по данным наблюдений на Камчатке // Физика Земли. 2019. № 4. С.48–71.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Ландер А.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Тутков Н.Н. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с  $MW=7.8$  на границе Командорской сейсмической брешы // Вестник КРАУНЦ. 2017. № 3. Вып. 35. С.22–25.
- Geist Eric L., Childs Jonathan R., Scholl David W. The origin of summit basins of the aleutian ridge: implications for block rotation of an arc massif // Tectonics. 1988. V. 7, N 2. P.327–341.
- Lay T., Ye L., Bai Ye., Cheung K.F., Kanamori H., Freymueller J., Steblou G.M., Kogan M.G. Rupture Along 400 km of the Bering Fracture Zone in the Komandorsky Islands Earthquake ( $M_w=7.8$ ) of 17 July 2017 // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44, N 24. P.12161–12169. doi: 10.1002/2017 GL076148
- Nikolaevskiy V.N., Garagash I.A. Earth crust structure as result of rock fracturing at high pressure-temperature conditions // Proceedings of the International conference on coupled processes, part 2. Stockholm. 2004. P.725–730.
- Shor G.G., Fornary D.J. Seismic refraction measurements in the Kamchatka Basin Western Bering Sea // J. Geophys. Res. 1976. V. 81, N 29. P.5260–5266.
- Woodcock N.H., Fischer M. Strike-slip duplexes // J. Struct. Geol. 1986. V. 8, N 7. P.725–735.

#### Сведения об авторах

**СЛАВИНА Лидия Борисовна** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-87-25. E-mail: slavina@ifz.ru

**КУЧАЙ Марк Соломонович** – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-99-50. E-mail: kuchay@ifz.ru

# ON THE STRESS FIELD EVALUATION OF THE COMMANDER BLOCK OF THE ALEUTIAN ISLAND ARC BASED ON THE KINEMATIC PARAMETER $V_p/V_s$ DATA AND ON THE FOCAL EARTHQUAKE MECHANISMS

L.B. Slavina, M.S. Kuchai

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**Abstract.** The kinematic parameter  $V_p/V_s$  was used to study the stress field dynamics of the geological and geophysical environment of the Komandorsky block of the Aleutian island arc. Real-time seismic mode observations of stationary seismic digital network KF GS RAS are used.

It has been established that according to the nature of distribution and grouping in space and depth of the anomalous values of the  $V_p/V_s$  parameter, it is possible to distinguish the characteristic features of the stress field for tectonic structures and faults. Assess the nature and type of offsets on them. The stress field in kinematics indicates the shear nature of dislocations along the Bering Fault, one of the most seismically active western segment of the Commander block. For the northeast plane of the fault, plunging under the Commander depression, characterized by lower values of  $V_p/V_s$ . That may indicate the dilatancy nature of the process, the process of stretching in the stress field.

The estimates of the stress field by the  $V_p/V_s$  parameter are compared with the mechanisms of the foci of strong earthquakes that have occurred in this region in recent years.

The sections constructed from the field of  $V_p/V_s$  values are compared with the acoustic sections obtained during offshore work using the continuous seismic profiling method (NSP) during the International Geophysical Year.

Considered the question of the existence or absence of a subduction zone, i.e. diving Pacific plate under the Commander block of the Aleutian island arc.

The results indicate that it is possible to use the method of observation of the  $V_p/V_s$  parameter in the operational evaluation of the stress field in the future, according to regional seismic activity.

**Keywords:** earthquake, seismic wave velocity,  $V_p/V_s$  value, subduction zone, the Commander block of the Aleutian island arc.

## References

- Balakina L.M., Moskvina A.G., Osobennosti seysmogennoy protsessy v Aleutskoy ostrovnoy duge. III. Zemletryaseniya v zapadnoy i vostochnoy okrainakh dugi, *Fizika Zemli*, 2010, no. 4, pp. 9-34.
- Chebrov D.V., Kugaenko Yu.A., Abubakirov I.R., Lander A.V., Pavlov V.M., Saltykov V.A., Titkov N.N. The July 17th, 2017  $M_w=7.8$  earthquake on the border of the Komandor seismic gap (western part of the Aleutian arc), *Vestnik KRAUNC*, 2017, vol. 35(3), pp. 22-25.
- Chebrov D.V., Kugayenko Yu.A., Lander A.V., Abubakirov I.R., Gusev A.A., Droznina S.Ya., Mityushkina S.V., Ototyuk D.A., Pavlov V.M., Titkov N.N., Blizhne-Aleutskoye zemletryaseniye 17.07.2017 s.g.,  $M_w=7.8$ . Prot'yazhennyy razryv vdol' Komandorskogo bloka Aleutskoy ostrovnoy dugi po dannym nablyudeniya na Kamchatke, *Fizika Zemli*, 2019, no. 4, pp. 48-71.
- Dubinina Ye.P., Transformnyye razlomy okeanicheskoy litosfery. M.: MGU, 1987, 181 p.
- Geist E.L., Childs J.R., Scholl D.W. The origin of summit basins of the Aleutian ridge: implications for block rotation of an arc massif, *Tectonics*, 1988, vol. 7, no. 2, pp. 327-341.
- Garagash I.A. O khrupkom razrushenii uprugikh tel s bol'shim chislom treshchin, *Mekhanika tektonicheskikh protsessov*, Alma-Ata, Nauka, 1983, pp. 61-74.
- Garagash I.A., Khaydarov M.S., Model' razvitiya seysmicheskogo protsessy v zone tektonicheskogo razloma pored sil'nym zemletryaseniym, *Seysmologicheskkiye issledovaniya*, 1989, no. 11, pp. 88-97.
- Gordeyev Ye.I., Pinegina T.K., Lander A.V., Kozhurin A.I., Beringiya: seysmicheskaya opasnost' i fundamental'nyye voprosy geotektoniki, *Fizika Zemli*, 2015, no. 4, pp. 58-67.
- Lay T., Ye L., Bai Ye., Cheung K.F., Kanamori H., Freymueller J., Steblou G.M., Kogan M.G., Rupture Along 400 km of the Bering Fracture Zone in the Komandorsky Islands Earthquake ( $M_w=7.8$ ) of 17 July 2017, *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44, no. 24, pp. 12161-12169, doi: 10.1002/2017 GL076148

- Levin V.Ye., Magus'kin M.A., Bakhtiarov V.F., Pavlov V.M., Titkov N.N., Mul'tisistemnyy geodezicheskiy monitoring sovremennykh dvizheniy zemnoy kory na Kamchatke i Komandorskikh ostrovakh, *Vulkanologiya i seysmologiya*, 2006, no. 3, pp. 54-67.
- Lobkovskiy L.I., Baranov B.V., Dozorova K.A., Mazova R.Kh., Kisel'man B.A., Baranova N.A., Komandorskaya seysmicheskaya bresh': prognos zemletryaseniya i raschet tsunami, *Okeanologiya*, 2014, vol. 54, no. 4, pp. 561-573.
- Lutikov A.I., Rogozhin Ye.A., Dontsova G.Yu., Zhukovets V.N., Zemletryaseniye 17.07.2017, Mw=7.8 vblizi Komandorskikh ostrovov i sil'nyye seysmicheskiye proyavleniya v zapadnom segmente Aleutskoy ostrovnoy dugi, *Vulkanologiya i Seysmologiya*, 2019, no. 2, pp. 52-66.
- Murav'yev A.V., Seliverstov N.I., Smirnov YA.B., Sugrobov V.M., Teplovoy potok v rayone podvodnogo chetvertichnogo vulkanizma Komandorskoy kotloviny, *Dokl. AN SSSR*, 1990, vol. 312, no. 2, pp. 438-443.
- Nikolaevskiy V.N., Garagash I.A., Earth crust structure as result of rock fracturing at high pressure-temperature conditions, *Proceedings of the International conference on coupled processes*, part 2. Stockholm, 2004, pp. 725-730.
- Seliverstov N.I., Stroyeniye dna prikamchatskikh akvatoriy i geodinamika zony sochleneniya Kurilo-Kamchatskoy i Aleutskoy ostrovnykh dug, M.: Nauchnyy mir, 1998, 164 p.
- Seliverstov N.I., Geodinamika zony sochleneniya Kurilo-Kamchatskoy i Aleutskoy ostrovnykh dug, Petropavlovsk-Kamchatskiy: Izd-vo KamGU im.Vitusa Beringa, 2009, 191 p.
- Seliverstov N.I., Podvodnyye morfostruktury Kurilo-Kamchatskoy i Aleutskoy ostrovnykh dug, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2013, 161 p.
- Shor G.G., Fornary D.J., Seismic refraction measurements in the Kamchatka Basin Western Bering Sea, *J. Geophys. Res.*, 1976, vol. 81, no. 29, pp. 5260-5266.
- Slavina L.B., Garagash I.A., Myachkin V.V., Gorel'chik V.I., Solov'yev N.V., Izmeneniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i kinematicheskikh parametrov sredey vo vremya Bol'shogo treshchinnogo Tolbachinskogo izverzheniya, *Vulkanologiya i seysmologiya*, 1999, no. 1, pp. 79-86.
- Slavina L.B., Gorel'chik V.I., Otrazheniye fizicheskikh protsessov podgotovki zemletryaseniya i izverzheniy vulkanov v pole vremen probega seysmicheskikh voln, *Ekspierimental'nyye i chislennyye metody v fizike ochaga zemletryaseniya*, M.: Nauka, 1989, pp. 44-53.
- Slavina L.B., Kuchay M.S., Likhodeyev D.V., Abdullayeva R.R., Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zon seysmotektonicheskoy aktivnosti po kinematicheskomu parametru  $V_p/V_s$  na primere struktur Bol'shogo Kavkaza, Kurinskoy depressii, Zakavkaz'ya i zapadnogo Prikaspiya, *Voprosy inzhenernoy seysmologii*, 2017, vol. 44, no. 1, pp. 31-56.
- Slavina L.B., Kuz'mina T.A., Myachkin V.V., K voprosu o vremeni i meste vzniknoveniya kinematicheskikh predvestnikov sil'nykh zemletryaseniya, *Model'nyye i naturnyye issledovaniya ochagov zemletryaseniya*, M.: Nauka, 1991, pp. 71-78.
- Slavina L.B., Tagizade T.T., Gorel'chik V.I., O vozmozhnosti vyyavleniya zon aktivizatsii glubinnnykh razlomov po parametru  $V_p/V_s$ , *Doklady akademii nauk SSSR*, 1985, vol. 282, no. 3, pp. 550-554.
- Stroyeniye zemnoy kory v oblasti perekhoda ot Aziatskogo kontinenta k Tikhomu okeanu, M., Nauka, 1964, 308 p.
- Ushakov S.A., Galushkin Yu.I., Gaponenko G.I., Dubinin Ye.P., Ivanov S.S., Ivanov O.P., Kaverznev K.M., Shimarayev V.N., *Gravitatsionnoye pole i rel'yef dna okeana*, L.: Nedra, 1979, 295 p.
- Woodcock N.H., Fischer M., Strike-slip duplexes, *J. Struct. Geol.*, 1986, vol. 8, no. 7, pp. 725-735.
- Zverev S.M., Kapustyan N.K., Seysmicheskiye issledovaniya litosfery Tikhogo okeana, M.: Nauka, 1980, 207 p.