

© Автор, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.34

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.005-021>
<https://www.elibrary.ru/tnsita>

Некоторые особенности морфологии сейсмофокальной зоны Камчатского региона

Ю. В. Шевченко

E-mail: klb@emsd.ru

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск Камчатский, Россия

Резюме. Объектом исследования в данной работе является структура сейсмофокальной зоны Камчатского региона как части Курило-Камчатской переходной зоны конвергенции. При исследовании морфологии фокальной зоны выделено семь слоев в соответствии с распределением сейсмической энергии по глубине. На основе инструментальных наблюдений за 60 лет (1962–2021 гг.) для каждого слоя построены карты эпицентров землетрясений Камчатского региона и получены характеристики сейсмичности: количество событий, глубины пиковых значений энергии, суммарная энергия, отношение суммарной энергии землетрясений выше 14 класса к суммарной энергии землетрясений от 10 до 14 класса. Почти половина всей сейсмической энергии региона за 60 лет пришлась на глубины более 550 км. Обнаружены особенности в распределении землетрясений: количество их на внешнем склоне желоба (вал Зенкевича) к юго-западу от Авачинского залива больше, чем к северо-востоку; в слое на глубинах 80–130 км эпицентры землетрясений в Камчатском заливе маркируют протяженный линеймент, на продолжение которого попадают вулканы Ключевской группы и вулкан Толбачик; полоса землетрясений для глубин 130–180 км накладывается на структуру вулканического пояса. На вертикальной проекции гипоцентров участка сейсмофокальной зоны к югу от п-ова Шипунский выделяется круто падающий разлом, отсекающий подвижный блок фронтального участка от континентальной литосферы. На проекции участка фокального слоя, включающего вулкан Толбачик и Ключевскую группу вулканов, обнаружен вертикальный излом под вулканами на глубине 140–180 км. На основе представленных в статье данных предложена гипотеза, объясняющая морфологию сейсмофокальной зоны не только погружением океанической литосферы, но и мантийным течением, направленным к юго-востоку из-под окраины Азии.

Ключевые слова: землетрясение, Курило-Камчатская островная дуга, морфология сейсмофокальной зоны, Камчатка

Some features of the morphology of the seismic focal zone of the Kamchatka region

Yury V. Shevchenko

E-mail: klb@emsd.ru

Kamchatka Branch of the FRC "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences",
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract. The object of study in this paper is the structure of the seismic focal zone of the Kamchatka region as a part of the Kuril-Kamchatka transitional convergence zone. When studying the morphology of the focal zone, seven layers were distinguished in accordance with the distribution of seismic energy by depth. Based on instrumental observations over 60 years (1962–2021), the maps of earthquake epicenters in the Kamchatka region were constructed for each layer, and seismicity characteristics were obtained: the number of events, depths of peak energy values, total energy, and the ratio of the total energy of earthquakes above class 14 to the total energy of earthquakes from class 10 to 14. Almost half of all seismic energy in the region over 60 years occurred at depths greater than 550 km. Features in the distribution of earthquakes were discovered: their number on the outer slope of the trench (Zenkevich Swell) to the SW of the Avacha Bay is greater than to the NE; in the layer at depths of 80–130 km, the epicenters of earthquakes in the Kamchatka Bay mark an extended lineament, the continuation of which includes the volcanoes of the Klyuchevskaya group and the Tolbachik volcano; the band of earthquakes for depths of 130–180 km and the

structure of the volcanic belt overlap. On the vertical projection of the hypocenters of the section of the seismic focal zone to the south of the Shipunsky Peninsula, a steeply dipping fault separating the moving block of the frontal section from the continental lithosphere is distinguished. On the projection of the focal layer section, including the Tolbachik volcano and the Klyuchevskaya group of volcanoes, a vertical fracture was found under the volcanoes at a depth of 140–180 km. Based on the data presented in the article, a hypothesis explaining the morphology of the seismic focal zone not only by the subsidence of the oceanic lithosphere but also by the mantle flow directed to the SE from under the margin of Asia is proposed.

Keywords: earthquake, Kurile-Kamchatka island arc, morphology of the seismic focal zone, Kamchatka

Для цитирования: Шевченко Ю.В. Некоторые особенности морфологии сейсмофокальной зоны Камчатского региона. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 1, с. 5–21. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.005-021>; <https://www.elibrary.ru/tnsita>

For citation: Shevchenko Yu.V. Some features of the morphology of the seismic focal zone of the Kamchatka region. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 1, pp. 5–21. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.005-021>; <https://www.elibrary.ru/tnsita>

Финансирование и благодарности

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования Камчатского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». Автор благодарит С.А. Шевченко за помощь в подготовке иллюстраций для статьи.

Funding and Acknowledgements

The work was carried out within the framework of budgetary funding of the Kamchatka Branch of the FRC “United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”. The author expresses his gratitude to Svetlana A. Shevchenko for assistance in preparing illustrations for this article.

Введение

Сейсмичность Курило-Камчатского звена Тихоокеанского сейсмического пояса по уровню близка к максимальной на планете. Среди многих задач при изучении сейсмичности региона можно выделить исследования структуры сейсмичности фокального пояса. По существу, изучение строения сейсмофокальной (СФ) зоны Курило-Камчатской дуги началось после создания к 1961 г. сети сейсмических станций [1, 2].

Одним из первых содержательных исследований строения переходной зоны от океана к континенту в районе Камчатки была работа [3]. На основе изучения времен пробега сейсмических волн были определены основные черты тектоники Камчатки, особенности ее строения и оценены некоторые физические параметры верхней мантии Курило-Камчатской дуги.

В статье [4] построены поперечные разрезы сейсмофокальной зоны Камчатки и сделан вывод о сходстве их формы и строения вдоль Камчатки. Показано двухслойное строение фокальной зоны и положение области максимальной сейсмичности на глубинах 0–40 км.

Карты распределения эпицентров землетрясений энергетического класса $K > 8.5$ для

5 слоев (0–50, 51–100, 101–150, 151–200, 201–250 км) за 20 лет наблюдений и вертикальные разрезы вкост СФ зоны в районе п-ова Шипунский и п-ова Камчатский представлены в работе [5]. Сделан вывод, что основная часть землетрясений, включая наиболее сильные, происходит между восточным побережьем Камчатки и желобом на глубинах до 100 км. Подтверждено двухслойное расположение очагов в наклонной части фокального слоя.

Работа [6] содержит обзор коровой тектонической сейсмичности суши Камчатки на глубинах до 50 км. Выделены участки повышенной концентрации землетрясений, сделана попытка сопоставить структурную организацию этих участков с разломными зонами.

В статье [7] представлены закономерности распределения слабых землетрясений классов 8–10. Построены 17 поперечных и 5 продольных разрезов фокального слоя Камчатки. Дано объяснение наличию двойного сейсмофокального слоя в рамках концепции дегидратации океанической литосферы.

В настоящей статье на основе расширенного объема данных инструментальных наблюдений за сейсмичностью с 1962 по 2021 г. уточняются особенности структуры сейсмофокальной зоны Камчатского региона. На рис. 1 а

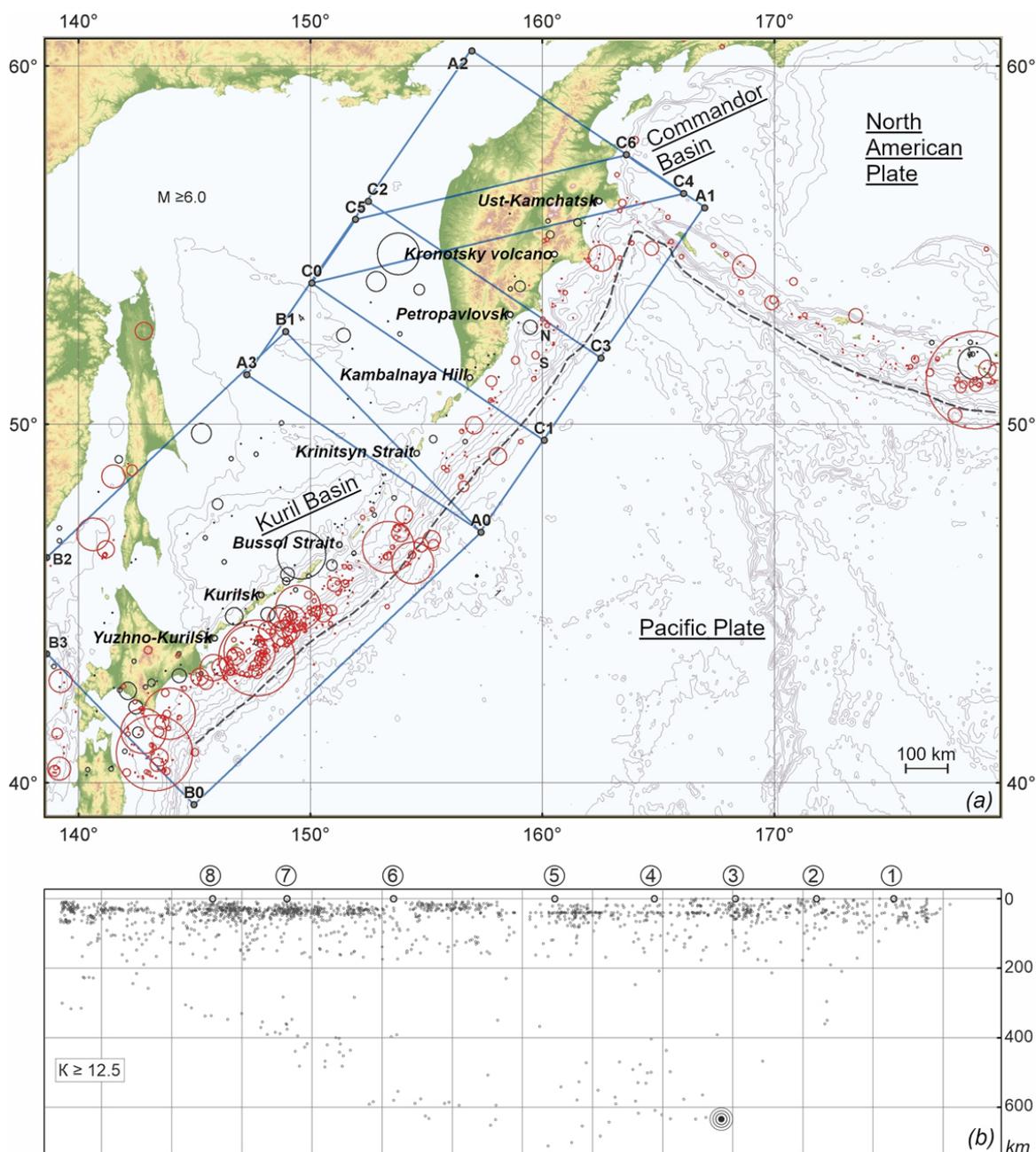


Рис. 1. (а) Карта распределения эпицентров землетрясений с $M \geq 6$ в Курило-Камчатской и западной части Алеутской островодужных системах за период инструментальных наблюдений с 1962 по 2021 г. Очаги землетрясений показаны кругами, площади которых в масштабе карты соответствуют площади очагов. Черными кругами обозначены события с глубиной более 100 км, красными – менее 100 км. S, N – положение южного и северного блоков хребта Шатского. Прямоугольником $A_0-A_1-A_2-A_3$ на карте выделен участок, именуемый в дальнейшем «Камчатский регион». Морфологические оси желобов обозначены пунктиром. (б) Проекция на вертикальный профиль $B_0-A_0-A_1$ гипоцентров землетрясений класса $K \geq 12.5$ участков $A_0-A_1-A_2-A_3$ и $B_0-A_0-B_1-B_2-B_3$. Окружности с точкой в центре отмечают позицию гипоцентра Охотоморского землетрясения ($M = 8.3$). Номера соответствуют пунктам на карте: 1 – Усть-Камчатск, 2 – вулкан Кронотский, 3 – Петропавловск, 4 – вулкан Камбальная Сопка, 5 – прол. Криницына, 6 – прол. Буссоль, 7 – Курильск, 8 – Южно-Курильск.

Fig. 1. (a) Map of the distribution of the earthquake epicenters with $M \geq 6$ in the Kuril-Kamchatka and western Aleutian island arc systems for the period of instrumental observations from 1962 to 2021. Earthquake foci are shown as circles, the areas of which on the map scale correspond to the area of the foci. Black circles denote events with a depth of more than 100 km, red ones denote less than 100 km. S and N indicate position of the southern and northern blocks of the Shatsky Ridge. Rectangle $A_0-A_1-A_2-A_3$ highlights the area hereinafter referred to as “the Kamchatka region” on the map. The morphological axes of the trenches are indicated by a dotted line. (b) Projection of hypocenters of $K \geq 12.5$ class earthquakes of $A_0-A_1-A_2-A_3$ and $B_0-A_0-B_1-B_2-B_3$ sections onto vertical profile $B_0-A_0-A_1$. Circles with a dot in the center indicate the position of the hypocenter of the Sea of Okhotsk earthquake ($M = 8.3$). The numbers correspond to the map points: 1 – Ust-Kamchatsk; 2 – Kronotsky volcano; 3 – Petropavlovsk; 4 – Kamalnaya Sopka volcano; 5 – Krinitsyn strait; 6 – Bussol strait; 7 – Kurilsk; 8 – Yuzhno-Kurilsk.

показано распределение эпицентров землетрясений с $M \geq 6$ в Курило-Камчатской и западной части Алеутской островодужных системах за период с 1962 по 2021 г. Для более адекватного представления сейсмичности региона очаги землетрясений показаны кругами, площади которых в масштабе карты соответствуют площади очагов. Расчет размеров очагов землетрясений выполнен автором в соответствии с моделью круговой трещины [8]. Для событий с глубиной очага до 100 км принималось значение сброшенного напряжения $\Delta\sigma = 3$ МПа [9, 10]. Глубже сброшенное напряжение менялось пропорционально модулю сдвига в соответствии с моделью земли ak135 [11].

Материалы

В целях исследования использованы данные о землетрясениях с 1962 по 2021 г. из каталога КФ ЕГС РАН [12, 13], каталога ISC (International Seismological Centre) [14] и каталога СМТ (Centroid-Moment-Tensor) [15, 16]. За этот период менялись количество действующих станций и апертура сети в Курило-Камчатском регионе. С 1996 г. начался переход на цифровую регистрацию. Все это позволило снизить представительную величину класса регистрируемых землетрясений. Чтобы получить однородную выборку событий за весь период наблюдений, использовались землетрясения начиная с 10 класса [17] в пределах выделенной на карте (рис. 1 а) прямоугольной области A_0 – A_1 – A_2 – A_3 (14 465 событий), которую мы называем Камчатским регионом.

Результаты

Северо-восточная граница Камчатского региона проходит немного севернее участка сочленения Курило-Камчатской и западной части Алеутской островодужных систем. Юго-западная граница пересекает Курильскую островную дугу немного южнее прол. Криницына, разделяя северную и центральную части Курильской дуги. На рис. 1 видно, что на этой границе меняется характер сейсмичности:

вдоль границы глубоких землетрясений почти нет, к юго-западу сильных глубоких землетрясений мало, северо-восточнее наблюдается высокая сейсмическая активность на больших глубинах. Строение земной коры севернее и южнее выбранной границы также различно. В работе [18] приводятся важные различия в структуре фланговых участков Курильской островной дуги и ее центрального звена. По материалам геологических и геофизических исследований для осадочных толщ получены значения: 3.5–5 км на юго-западе, 7–7.5 км на северо-востоке, 1.5–2 км в центре. Мощность земной коры резко меняется от северо-восточного и юго-западного участков островной дуги к центральной части приблизительно с 30 км до 10 км. В плане конфигурация изогипс мощности осадков и кристаллической части земной коры имеет на фланговых участках V-образную форму, постепенно выклиниваясь к центру островной дуги.

Для Камчатского региона большинство землетрясений класса $K \geq 10$ имеет тектоническую природу и происходит в СФ зоне Вадати–Заварицкого–Беньофа как результат взаимодействия литосферных плит при субдукции океанической плиты. При погружении Тихоокеанской литосферной плиты землетрясения наблюдаются до глубин около 700 км. Сейсмическая активность (количество событий и энергия) на разных глубинах заметно меняется, поэтому целесообразно рассмотреть параметры сейсмического режима послойно. Изменение сейсмической энергии \bar{E} и числа землетрясений с глубиной для Камчатского региона иллюстрируется графиками на рис. 2. До глубины 200 км средние проводилось с шагом 10 км, глубже – с шагом 20 км. В соответствии с положением максимумов \bar{E} выделено 7 сейсмофокальных слоев с глубинами 0–35, 35–80, 80–130, 130–180, 180–230, 230–550, 550–700 км.

Фронтальный участок СФ зоны, на котором океаническая литосферная плита начинает погружаться под Камчатку и Курильскую островную дугу, относится к верхнему слою с глубиной до 35 км. Землетрясения в этом слое происходят в результате жесткого контакта и деформации сдвигающихся литосферных

плит. Сжатие континентальной литосферы вызывает хрупкие разрушения по множеству разломов между блоками земной коры и создает основную массу землетрясений. Сильнейшие землетрясения, связанные с пологими сдвигами/надвигами, происходят в пределах верхних двух слоев. На глубины 0–80 км приходится более 85 % событий $K \geq 10$ (см. таблицу).

Первый максимум \bar{E} приходится на глубину 15 км, второй – на глубину 45 км (рис. 2). Для первого и второго слоев сейсмически активной зоны характерно огромное количество событий за счет землетрясений небольших классов. Слабым землетрясениям отвечает рассеянная сейсмичность, связанная с мелкоблочной раздробленностью среды. Крупным

разломам сейсмически активной зоны соответствует сравнительно небольшое количество сильных событий, которые вносят основной вклад в суммарную энергию. Как правило, чем сильнее землетрясение, тем более надежно определяется его положение, поскольку вступления сейсмических волн уверенно выделяются на большем числе станций. Использование при построении карт всей выборки землетрясений (в первом слое это 6427 событий) делает картину смазанной за счет рассеянной сейсмичности. Поэтому при построении послойного распределения эпицентров на картах мелкого масштаба можно до некоторой степени игнорировать слабые события. Такой подход позволит лучше представить структуру сейсмичности

Таблица. Характеристики сейсмичности сейсмофокальной зоны Камчатского региона для разных глубин
Table. Seismicity characteristics of the seismic focal zone of the Kamchatka region for different depths

Слой	Глубина, км	n	E_c , Дж	h_p , км	k
1	0–35	6427	$1.3E+16$	15	3.2
2	35–80	5824	$1.5E+16$	45	2.7
3	80–130	989	$8.0E+15$	115	14
4	130–180	445	$4.8E+15$	175	22
5	180–230	127	$2.6E+15$	210	71
6	230–550	481	$1.6E+15$	490	3.9
7	550–700	172	$1.4E+17$	630	830

Примечания. n – количество событий в слое; E_c – суммарная энергия в слое; h_p – глубина для пиковых значений \bar{E} ; $k = \sum E(K \geq 14) / \sum E(10 \leq K < 14)$ – отношение суммарной энергии землетрясений класса $K \geq 14$ к суммарной энергии землетрясений класса от 10 до 14.

Notes. n , number of events in the layer; E_c , total energy in the layer; h_p , depths of peak values (\bar{E}); $k = \sum E(K \geq 14) / \sum E(10 \leq K < 14)$ indicates ratio of the total energy of earthquakes $K \geq 14$ to the total energy of earthquakes class from 10 to 14.

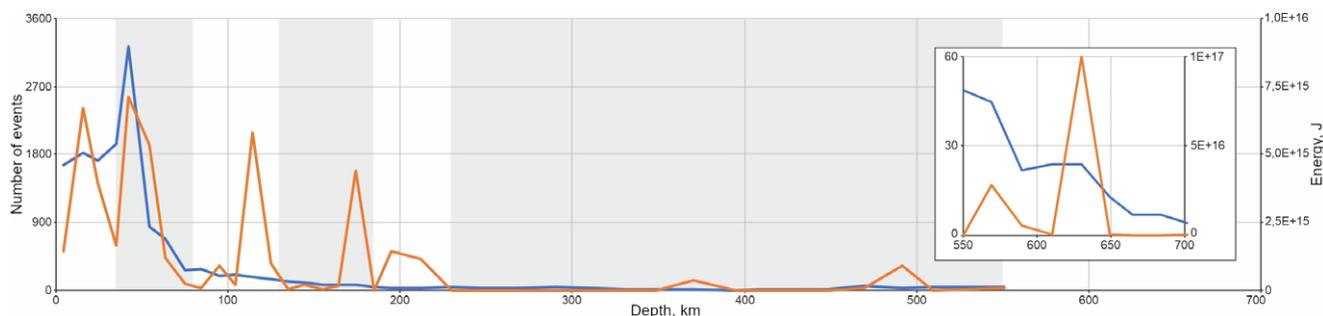


Рис. 2. Распределение сейсмической энергии (оранжевая линия) и числа землетрясений (синяя линия) по глубине для Камчатского региона. Чередованием тонировки и ее отсутствия отмечены фокальные слои, выделенные для анализа. Масштаб графиков на врезке для глубин 550–700 км увеличен.

Fig. 2. Distribution of seismic energy (orange line) and the number of earthquakes (blue line) by depth for the Kamchatka region. Shading separates the boundaries of the focal layers selected for the analysis. The scale of the graphs in the inset for depths of 550–700 km is increased.

фокальной зоны. Распределение эпицентров землетрясений Камчатского региона для первого и второго слоев показано на рис. 3 а, б.

В соответствии с принятыми представлениями, сложные тектонические движения при землетрясениях в первом слое можно условно разбить на три вида подвижек: пологие сдвиги/надвиги по контактной поверхности в зоне подвига, вызывающие наиболее крупные землетрясения; падающие под океан крутые взбросы с простираем вдоль желоба, связанные со сжатием фронтального выступа континентальной коры; разрывы, ориентированные поперек к простираению Курило-Камчатского желоба по границе контакта между соседними блоками нависающей коры [19, 20, 21, 22]. Группирование землетрясений на внутреннем склоне желоба, иногда в форме изогнутых полос (рис. 3 а), маркирует разломы между крупными блоками выступающих частей фронтального выступа. Привлекает вни-

мание блок между о. Парамушир и Авачинским заливом размером около 300 км вдоль СФ зоны. На участок СФ зоны, занимаемый этим блоком, приходится очаг землетрясения 04.11.1952 с магнитудой 8.5. Поперечные разломы севернее п-ова Шипунский развернуты на запад и разделяют блоки значительно меньшего размера (рис. 3 а, б). Возможно, разворот разломов вызван изменением направления погружения сегмента субдуцирующей плиты и появлением к северу от Авачинского залива ЮЗ компоненты смещения вдоль желоба (косая субдукция). Как следствие, можно предположить, что подводные горы и хребты на этом участке континентального склона Камчатки – складки при деформации фронтального выступа.

На рис. 3 а количество землетрясений на внешнем склоне желоба в юго-западной части СФ зоны больше, чем в северо-восточной, причем граница изменений проходит на юге

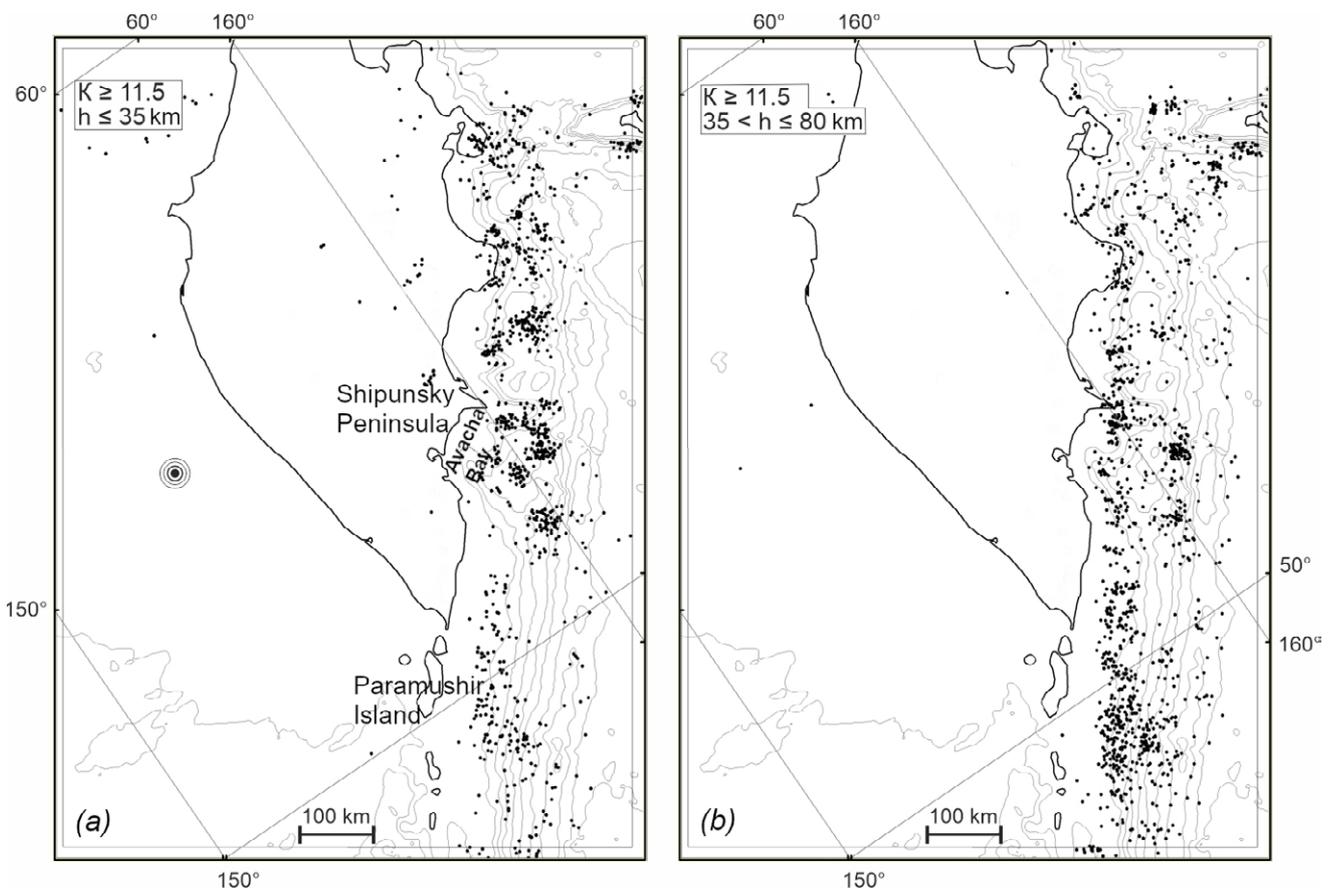


Рис. 3. Эпицентры землетрясений для первого (а) и второго (б) сейсмофокальных слоев Камчатского региона. Окружностями с точкой в центре отмечена позиция гипоцентра Охотоморского землетрясения ($M = 8.3$).

Fig. 3. Earthquake epicenters for the first (a) and second (b) seismic focal layers of the Kamchatka region. Circles with a dot in the center indicate the position of the hypocenter of the Sea of Okhotsk earthquake ($M = 8.3$).

Авачинского залива. Такая картина распределения землетрясений возможна в том случае, если линия начала взаимодействия континентальной и океанической плит к ЮЗ от Авачинского залива сдвинута к океану. Объяснить это можно тем, что складчатые структуры п-ова Камчатка на широте Петропавловска-Камчатского поворачивают на ЮВ и фронтальный выступ к ЮЗ от Авачинского залива больше выдвинут в сторону океана. Можно предположить, что от южного блока хребта Шатского (рис. 1 а) между этими сегментами фронтальных выступов проходит крупный поперечный разлом континентальной литосферы СЗ простирания. Исследованиями магнитных и гравитационных полей [23] выявлено наличие на юге Авачинского залива аномалий, поперечных к простиранию СФ зоны. Эти факты подтверждают выдвинутое предположение.

Примерно в 100 км от оси желоба, на глубинах 35–80 км, океаническая литосферная плита взаимодействует с мантийной частью континентальной литосферы. На рис. 3 а, б привлекает внимание четкая граница между зоной высокой сейсмичности и асейсмической зоной, пролегающая вдоль внутреннего склона желоба. Можно допустить, что к СЗ от границы на глубинах 35–80 км начинается сравнительно однородная и прочная мантийная часть континентальной литосферы. Жесткое взаимодействие слэба с мантийной частью континентальной литосферы является причиной изгиба слэба и вызывает землетрясения в океанической коре и фронтальном выступе континентальной коры к ЮВ от этой границы.

Изгиб океанической плиты, растяжение ее верхней стороны и сжатие нижней приводят к формированию краевого вала. Как следствие, на внешнем склоне желоба возникают мелкофокусные землетрясения, появляются разрывные нарушения и ступенчатые структуры океанической коры [23]. На рис. 4 а показаны механизмы наиболее сильных за время наблюдений землетрясений с внешней стороны желоба.

Из 18 представленных на рис. 4 а землетрясений 13 произошли на глубине 10–20 км, механизмы их очагов соответствуют сбросам. Пять землетрясений на этом рисунке с глуби-

нами около 40 км относятся к взбросам. Среднее простирание для всех событий совпадает с линией по азимуту 45 (среднеквадратичное отклонение 30), т.е. почти вдоль желоба.

На рис. 4 б показана проекция гипоцентров землетрясений полигона С₁–С₃–С₂–С₀ на вертикальную плоскость С₂–С₃. На этой проекции субвертикальная полоса группирования землетрясений маркирует круто падающий разлом, отсекающий подвижный блок фронтального участка континентальной коры. Разлом опускается до глубин около 50 км и заканчивается у оси желоба (стрелка на рис. 4 б). С подвижками по разломам этого типа, «поршневого» в терминологии [22], связывают образование тектонических террас на внутренних склонах желобов. На проекции гипоцентров полигона А₀–С₁–С₀–А₃ на профиль С₀–С₁ для участка СФ зоны напротив Северных Курил (рис. 4 с) сложно выделить отсекающий субвертикальный разлом. Возможно, подвижки «поршневого» типа в этом случае попадают на участок континентальной коры, разбитой на сравнительно небольшие блоки, и, в зависимости от позиции менее консолидированной границы между блоками, положение разлома при землетрясениях меняется.

Количество событий и суммарная энергия E_c в третьем (80–130 км) и четвертом (130–180 км) слоях в несколько раз меньше, чем во втором, однако растет доля сильных событий ($k \approx 15$ и $k \approx 22$). Пик \bar{E} соответствует глубинам 115 и 175 км (см. таблицу). Землетрясения в слоях распределены полосой без сгущений вдоль СФ зоны (рис. 5 а, б), исключая протяженный узкий линеамент на глубинах 80–130 км в Камчатском заливе, маркирующий разлом, рассекающий литосферу океанической плиты. Вулканы Ключевской группы и вулкан Толбачик попадают на продолжение этого разлома.

На уровне третьего слоя основная часть землетрясений происходит путем релаксации остаточных упругих деформаций на ослабленных участках океанической плиты [24].

Сейсмичность в четвертом слое, в рамках концепции существования серпентинитового слоя, подстилающего океаническую плиту [25, 26], а также серпентинизации пород океанической коры, насыщенных водой

перед погружением, коррелирует с процессом дегидратации и образованием водного флюида [24, 25, 27, 20, 23, 28]. Образование магмы связывают с плавлением пород океанической коры и мантийного клина под воздействием

флюидов [20]. На рис. 5 б полоса землетрясений для глубин 130–180 км накладывается на вулканический пояс, что можно объяснить расположением на этом уровне зоны образования первичной магмы.

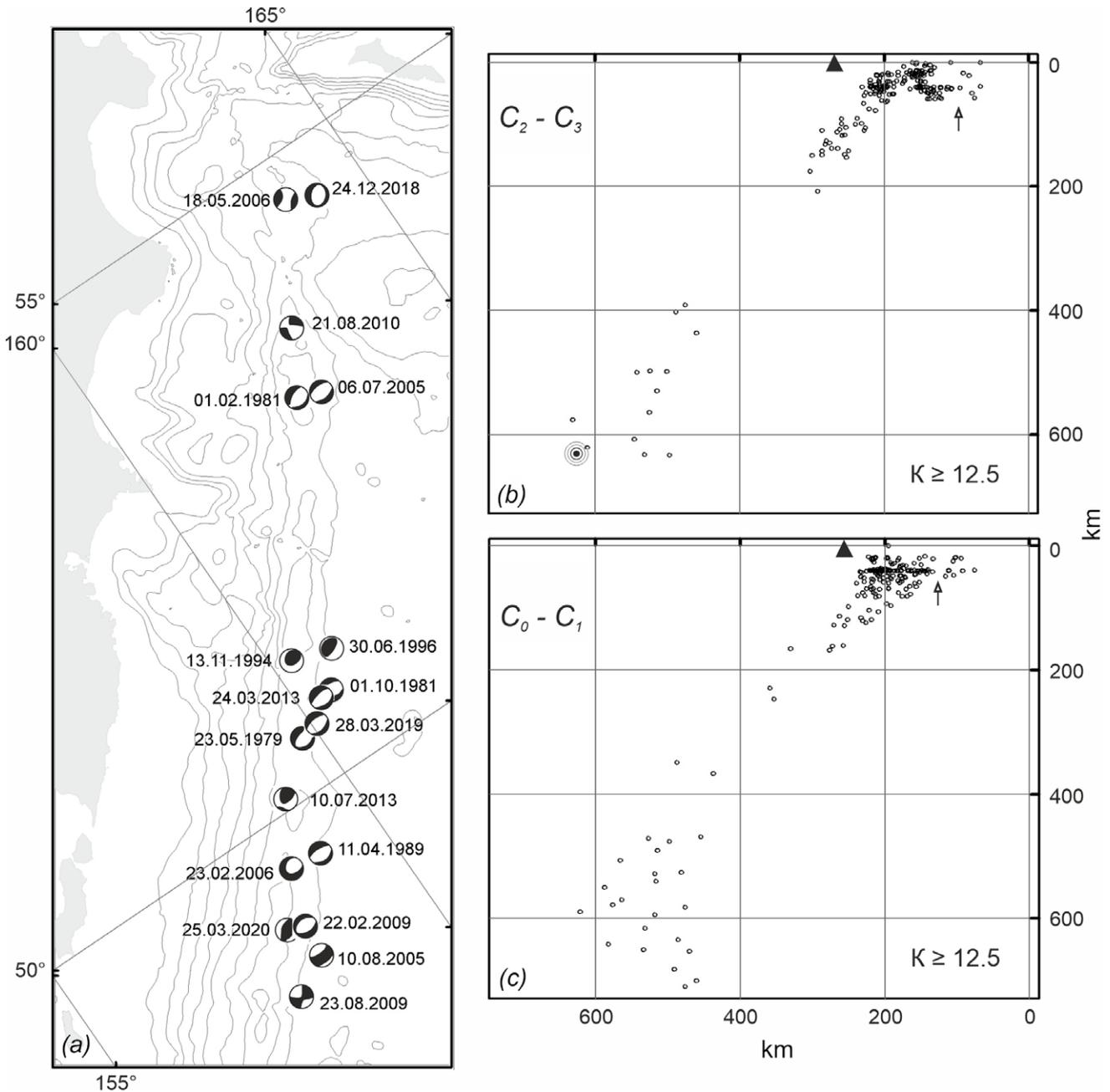


Рис. 4. (а) Эпицентры землетрясений на внешнем склоне желоба (механизмы землетрясений из каталога СМТ [15, 16]). (б) Проекция на вертикальную плоскость C_2-C_3 гипоцентров землетрясений полигона $C_1-C_3-C_2-C_0$ (рис. 1 а). (с) Проекция на вертикальную плоскость C_0-C_1 гипоцентров землетрясений полигона $A_0-C_1-C_0-A_3$. Треугольниками обозначены вулканы Авачинский (C_2-C_3) и Камбальная Сопка (C_0-C_1). Стрелками указано положение желоба. Окружности с точкой в центре отмечают позицию гипоцентра Охотоморского землетрясения.

Fig. 4. (a) Epicenters of earthquakes on the outer slope of the trench (earthquake mechanisms from the CMT catalog [15, 16]). (b) Projection onto the vertical plane C_2-C_3 of the hypocenters of earthquakes in the $C_1-C_3-C_2-C_0$ test site (Fig. 1 a). (c) Projection onto the vertical plane C_0-C_1 of the hypocenters of earthquakes in the $A_0-C_1-C_0-A_3$ test site. Triangles indicate Avachinsky volcano (C_2-C_3) and Kambalnaya Sopka (C_0-C_1). Arrows indicate the position of the trench. Circles with a dot in the center indicate the position of the hypocenter of the Sea of Okhotsk earthquake.

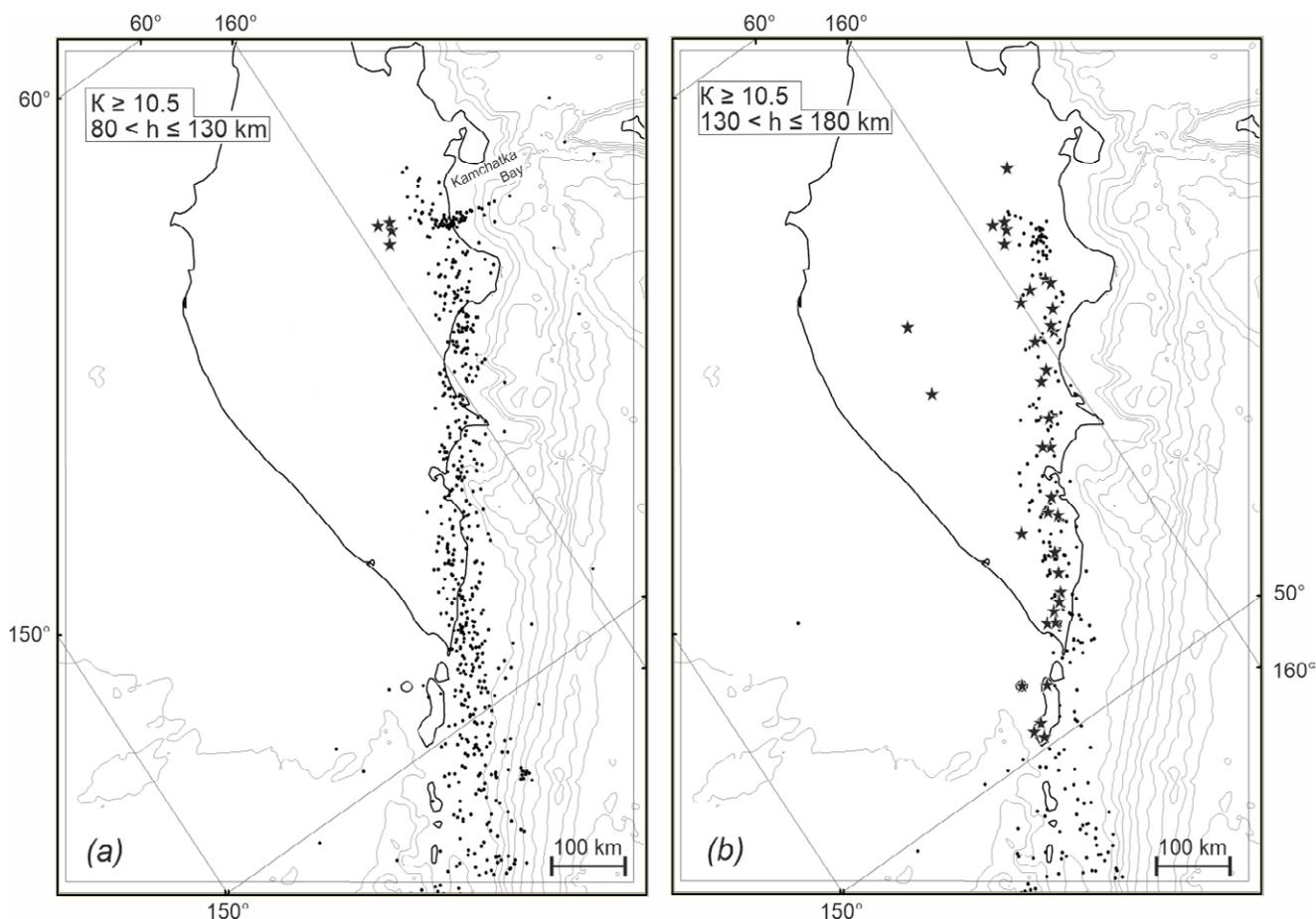


Рис. 5. Эпицентры землетрясений для третьего (а) и четвертого (б) фокальных слоев. Вулканы обозначены звездочками.
 Fig. 5. Earthquake epicenters for the third (a) and fourth (b) focal layers. Volcanoes are marked with asterisks.

На рис. 6 показана проекция гипоцентров землетрясений полигона $C_0-C_4-C_6-C_5$ на вертикальную плоскость C_0-C_4 . СФ зона на проекции C_0-C_4 образует вертикальный излом под вулканами Толбачик и Ключевской на глубинах 140–180 км. Возможно, здесь по краю слэба существует трещина, открывающая доступ вещества астеносферы из-под океанической плиты.

В пятом слое СФ зоны (рис. 7 а) количество событий сравнительно мало, велика доля сильных событий ($k \approx 71$). Примерно на этих глубинах происходит сближение двойных сейсмических зон, связанных с дегидратацией океанической коры и мантийной части океанической литосферы [29, 30, 28].

В шестом слое (рис. 7 б), при значительной толщине (230–550 км), суммарная энергия меньше, чем в пятом слое (см. таблицу), почти отсутствуют землетрясения выше класса 14 ($k \approx 4$), однако количество событий больше.

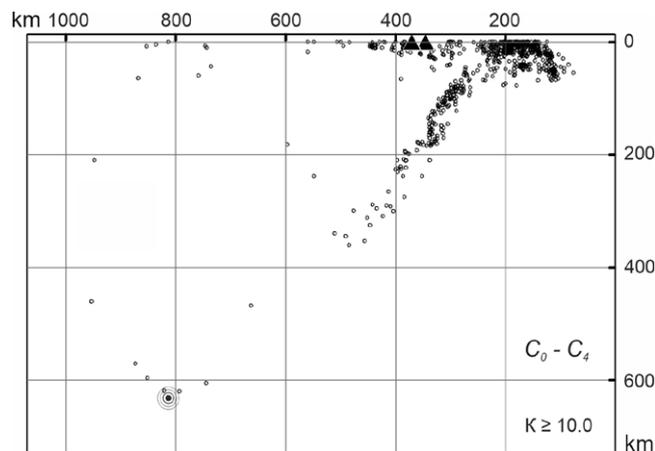


Рис. 6. Проекция гипоцентров землетрясений полигона $C_0-C_4-C_6-C_5$ на вертикальную плоскость по профилю C_0-C_4 . Позиция гипоцентра Охотоморского землетрясения с $M = 8.3$ отмечена окружностями с точкой в центре. Треугольниками обозначены вулканы Толбачик и Ключевской.

Fig. 6. Projection of earthquake hypocenters of the $C_0-C_4-C_6-C_5$ test site onto the vertical plane along the C_0-C_4 profile. Circles with a dot indicate the position of the hypocenter of the Sea of Okhotsk earthquake with $M = 8.3$. The Tolbachik and Klyuchevskoy volcanoes are marked with triangles.

Поскольку мантия на глубинах пятого и шестого слоев обладает пониженной вязкостью [27], контакт плита–мантия носит пластический характер, что обуславливает слабую сейсмичность на этих глубинах.

Глубже 550 км (седьмой слой) характеристики сейсмичности значительно меняются, прежде всего за счет Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г. с $M = 8.3$. При относительно небольшом числе событий наблюдается огромный рост суммарной энергии (см. таблицу), отношение k возрастает до 830. То есть это слой редких сильных землетрясений. На карте (рис. 8) можно отметить выстраивание землетрясений вдоль границ крупных блоков.

На рис. 9 кривые накопления нормированной кумулятивной сейсмической энергии землетрясений для Камчатского региона и для участка сейсмофокальной зоны $B_0-A_0-A_1-A_2-A_3-B_2$ (рис. 1 а) демонстрируют возрастание сейсмической активности с начала 2000-х годов до времени Охотоморского землетрясения.

На рис. 10 b, d представлены карты распределения землетрясений Камчатского региона с 01.01.2000 до 23.05.2013 (4892 дня до Охотоморского землетрясения) и на рис. 10 а, с – для интервала такой же длительности 10.08.1986 – 31.12.1999 (второй и третий слои СФ зоны).

Для периода 01.01.2000 – 23.05.2013 в пределах второго и третьего слоев наблюдается рост количества событий по сравнению с периодом 10.08.1986 – 31.12.1999. На рис. 10 b видно, что землетрясения на внешнем склоне желоба напротив Кроноцкого и Камчатского заливов выстраиваются по дугообразным линиям, сходящимся к центру Камчатского залива. Немного восточнее северного блока подводного хребта Шатского (рис. 1 а) выделяется компактное сгущение землетрясений в Авачинском заливе (рис. 10 b). Перед Охотоморским землетрясением здесь произошло уникальное по масштабам событие – крупный рой землетрясений. За неделю до Охотоморского землетрясения в области роя было зарегистри-

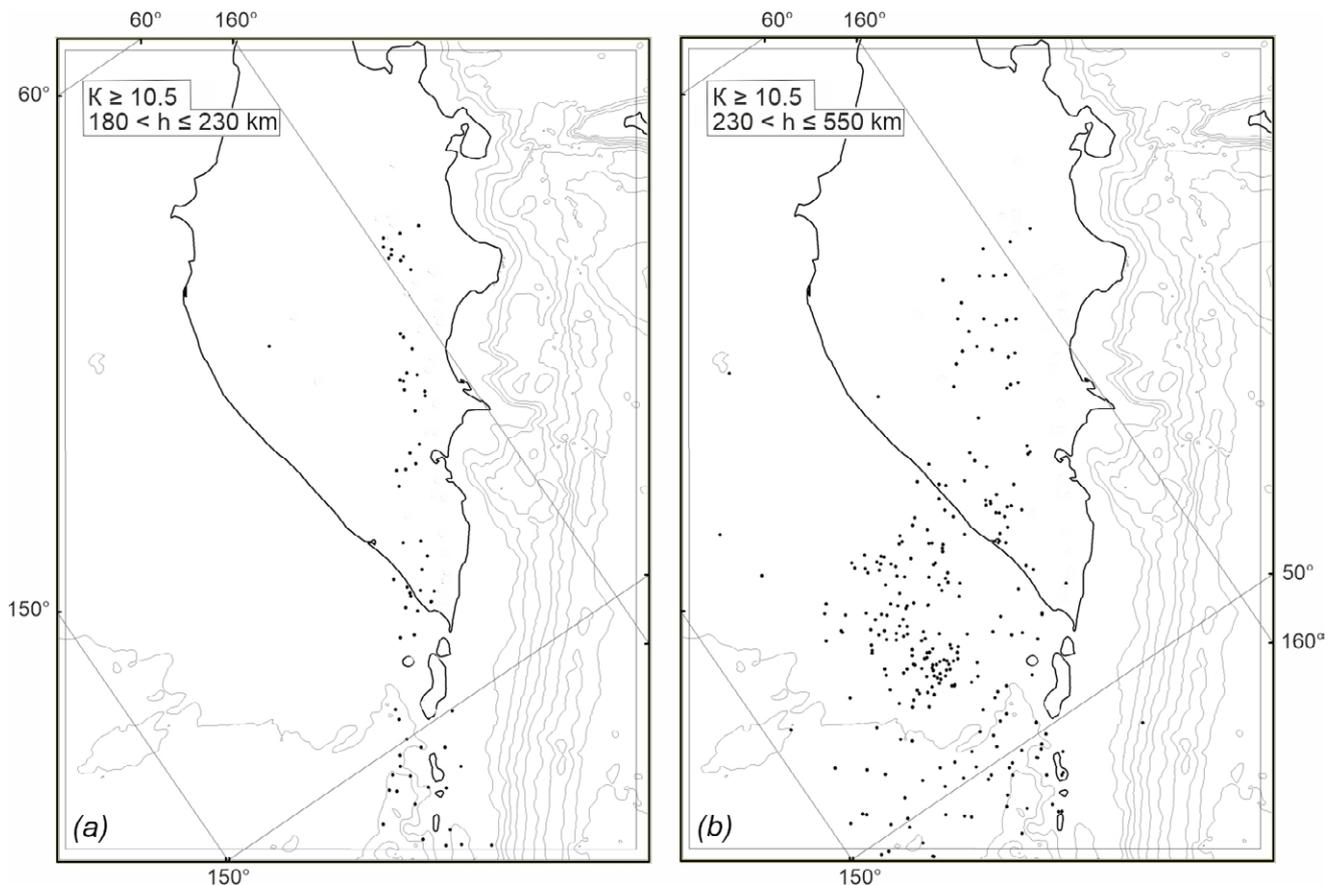


Рис. 7. Эпицентры землетрясений для пятого (а) и шестого (b) фокальных слоев.

Fig. 7. Earthquake epicenters for the fifth (a) and sixth (b) focal layers.

ровано несколько сот событий, из которых около 30 землетрясений класса 12–14. Результаты модельных экспериментов и натуральных наблюдений влияния вибраций на развитие разрыва [31, 32] показали, что слабое внешнее воздействие создает условия нелинейного соотношения между напряжениями и деформациями, в силу чего даже низкоамплитудные воздействия могут служить триггером к возникновению смещений берегов энергонасыщенных разломов, находящихся под напряжением. Не исключено, что интенсивная роевая активность в верхней части слэба непосредственно перед Охотоморским землетрясением могла быть триггером глубокого землетрясения в том же сегменте.

Значительный рост суммарной энергии глубже 550 км обеспечен прежде всего за счет Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г. Для объяснения причины глубоких землетря-

сений предложено несколько гипотез: сдвиговая неустойчивость; расщепление погружающейся океанической плиты (кора движется по границе верхняя – нижняя мантия, а ее нижняя, литосферная часть опускается в нижнюю мантию); уменьшение объема, вызванное фазовым переходом [33, 34].

На основе представленных в статье данных попытаемся обосновать гипотезу возможного

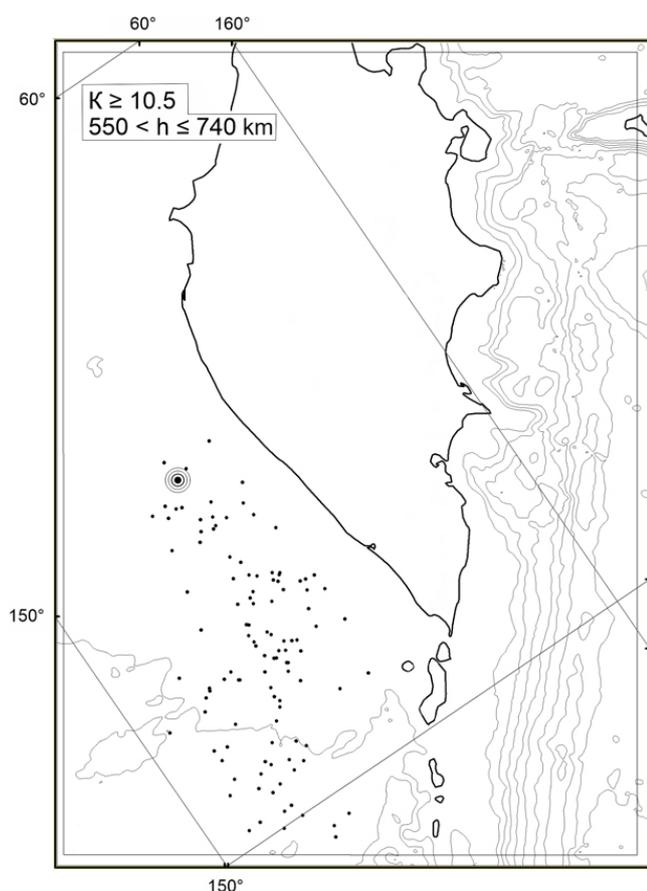


Рис. 8. Эпицентры землетрясений для седьмого фокального слоя. Землетрясение с $M = 8.3$ отмечено окружностями с точкой.
Fig. 8. Earthquake epicenters for the seventh focal layer. The earthquake with $M = 8.3$ is marked by the circles with dot.

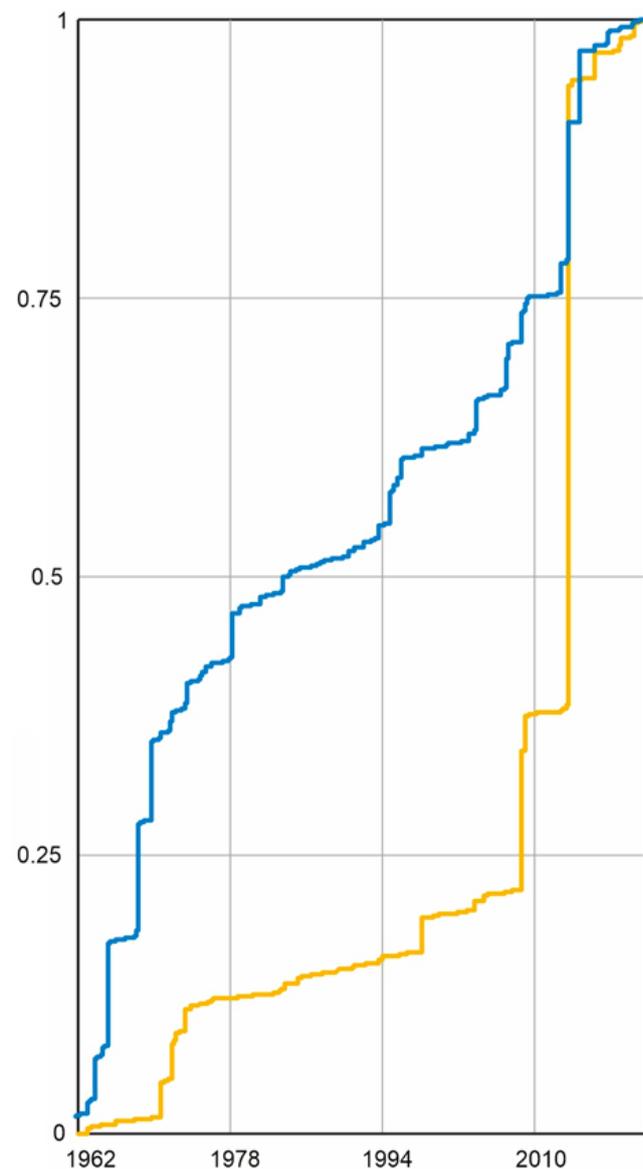


Рис. 9. Кривые накопления нормированной кумулятивной сейсмической энергии землетрясений для показанного на карте (рис. 1 а) участка $B_0-A_0-A_1-A_2-A_3-B_2-B_3$ (синяя линия, 34 670 событий класса $K \geq 10$) и для Камчатского региона (желтая линия, 14 465 событий $K \geq 10$).

Fig. 9. Curves of accumulation of normalized cumulative seismic energy of earthquakes for the section $B_0-A_0-A_1-A_2-A_3-B_2-B_3$ shown on the map (Fig. 1a) (blue line; 34,670 events of class $K \geq 10$) and for the Kamchatka region (yellow line; 14,465 events of $K \geq 10$).

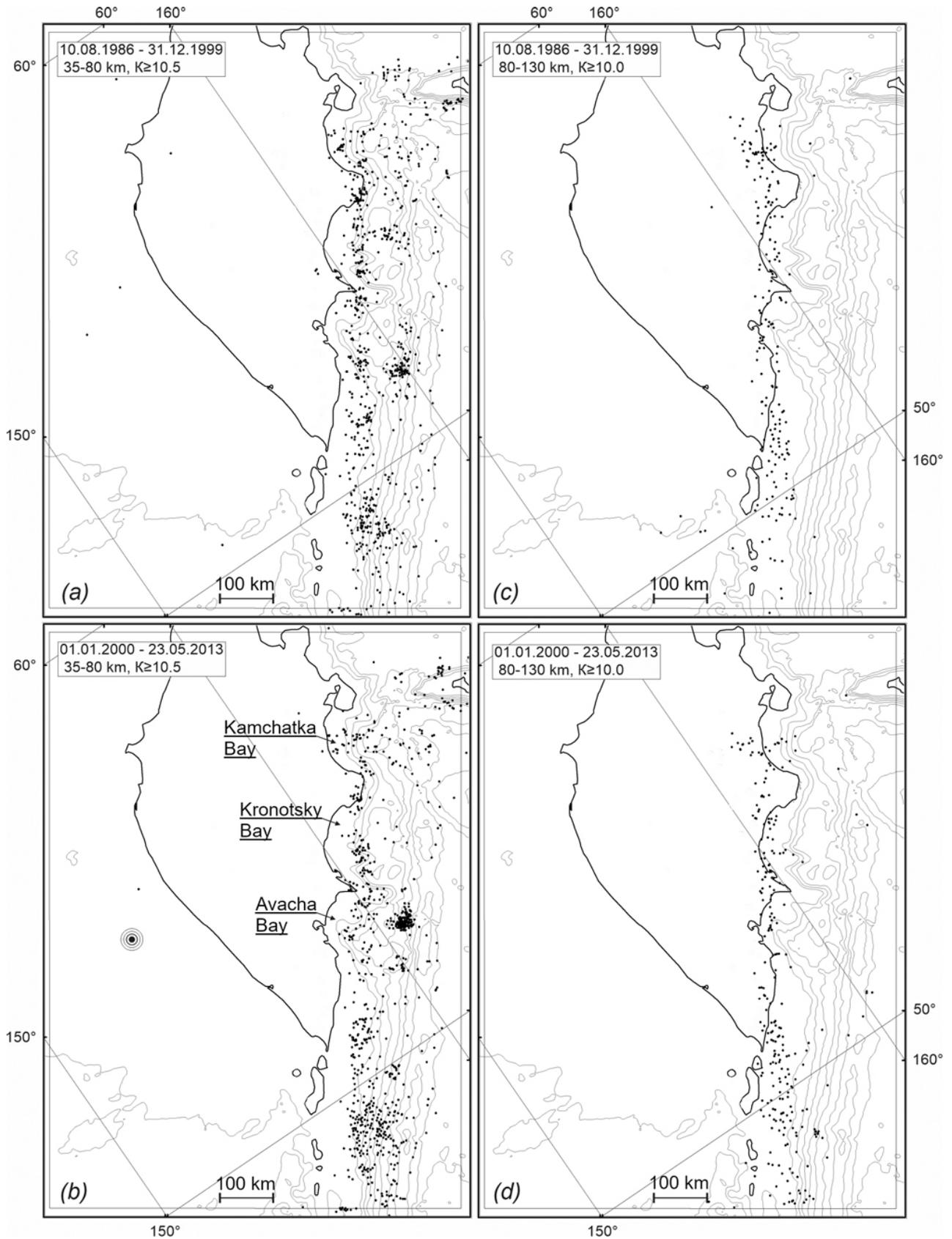


Рис. 10. Эпицентры землетрясений для глубин 35–80 км (а, б), 80–130 км (с, д) за временные интервалы 10.08.1986 – 31.12.1999 (а, с) и 01.01.2000 – 23.05.2013 (б, д).

Fig. 10. Epicenters of earthquakes for depths of 35–80 km (a, b), 80–130 km (c, d) for the time intervals of 10.08.1986 – 31.12.1999 (a, c) and 01.01.2000 – 23.05.2013 (b, d).

влияния на глубинную сейсмичность Курило-Камчатского региона астеносферного течения из-под окраины Азии [35, 36].

В пределах континентов мощность литосферы может достигать 300–400 км [19]. Ниже континентальную литосферу подстилает слой частично расплавленной мантии пониженной вязкости [28, 37]. Глубокое астеносферное течение из-под Евразийской литосферной плиты напирает на нижнюю часть погрузившегося слэба. Давление со стороны мантийного потока на плиту вызывает сильные глубокие землетрясения, например Охотоморское 24.05.2013 г. На рис. 1 б полоса гипоцентров землетрясений, поднимающаяся от нижнего края северной границы плиты, где произошло землетрясение с $M = 8.3$, маркирует зону наиболее сильных деформаций под давлением мантийного потока на слэб. Такое распределение гипоцентров предполагает, что в горизонтальной проекции мантийный поток встречается с плитой под острым углом. Мантийный поток, поднимаясь по наклонной плоскости океанической плиты, перемещается на ЮЗ вдоль слэба. Подъем потока к поверхности приводит к трансформации вещества континентальной литосферы. Проведенные в Охотском море структурные исследования методом глубинного сейсмического зондирования показали сокращение мощности коры под Курильской впадиной до 10 км [38]. Подъем горячего мантийного течения к поверхности и разогрев литосферы объясняет образование в районе Южно-Охотской глубоководной впадины сравнительно тонкой коры, близкой к океаническому типу с аномально высоким значением теплового потока [18, 23]. Во фронтальной части Центральных Курил выявлена структура растяжения [39], а в прол. Буссоль видна вертикальная асейсмическая область (рис. 1 б). Возможной причиной растяжения является движение мантийного потока вдоль СФ зоны.

Образование восточнее п-ова Камчатский Командорской котловины, как и Курильской, также можно связать с подъемом к поверхности мантийного течения из-под Евразийской литосферной плиты. Наклонным слэбом в

этом случае может быть погребенная под Северо-Американской плитой океаническая плита Кула [35, 40, 41]. Обнаруженные к северу от Алеутской дуги высокоскоростные аномалии интерпретированы [42] как остатки субдукционного комплекса. В геотермическом отношении для Командорской котловины также характерны высокие значения теплового потока [23].

Заключение

В данной работе исследованы особенности морфологии сейсмофокальной зоны Камчатского региона на основе инструментальных наблюдений с 1962 по 2021 г. В соответствии с пиковыми значениями распределения сейсмической энергии по глубине выделено семь фокальных слоев с глубинами 0–35, 35–80, 80–130, 130–180, 180–230, 230–550, 550–700 км. Более 85 % землетрясений с $K \geq 10$ происходит на глубинах до 80 км. Максимумы суммарной энергии приходятся на глубины $0 < h < 80$ км и $550 < h < 700$ км. Отношение $\sum E(K \geq 14) / \sum E(10 \leq K < 14)$ максимально для слоя $h > 550$ км.

Для каждого из выделенных слоев построены карты распределения эпицентров землетрясений. Количество землетрясений в слое $h < 35$ км на внешнем склоне желоба к ЮЗ от Авачинского залива несколько больше, чем к СВ. На основании этого можно предположить, что сегменты фронтального выступа на юге Авачинского залива разделяет крупный поперечный разлом континентальной литосферы СЗ простирания.

Группирование землетрясений на внутреннем склоне желоба вкост береговой линии, иногда в форме изогнутых полос, маркирует разломы между блоками выступающих частей континентальной коры. Область предполагаемого очага землетрясения 04.11.1952 с магнитудой 8.5 и крупный блок фронтального выступа между о. Парамушир и Авачинским заливом приблизительно совпадают. Поперечные разломы севернее п-ова Шипунский развернуты в субширотном направлении и разделяют блоки значительно меньшего размера

(Курило-Камчатская островодужная структура простирается в СВ направлении). Возможно, разворот разломов вызван изменением направления погружения сегмента субдуцирующей плиты и появлением к северу от Авачинского залива ЮЗ компоненты смещения вдоль желоба. В этом случае подводные горы и хребты на этом участке континентального склона Камчатки могут быть складками при деформации фронтального выступа.

Землетрясения в слое 35–80 км, происходящие в океанической коре и подошве выступа континентальной коры, связаны с жестким взаимодействием слэба с мантийной частью континентальной литосферы, вызывающим крутой изгиб океанической плиты. При этом высокая сейсмическая активность прекращается западнее хорошо выделяемой границы вдоль нависающего выступа континентальной коры. Можно допустить, что к СЗ от этой границы на глубинах 35–80 км начинается сравнительно однородная и прочная мантийная часть континентальной литосферы.

На глубинах 80–130 км количество событий и суммарная энергия снижаются, однако растет доля сильных событий. Землетрясения на этих глубинах распределены без сгущений в узкой полосе вдоль СФ зоны, исключая линейный элемент в Камчатском заливе, маркирующий разлом, пересекающий литосферу океанической плиты. Вулканы Ключевской группы и вулкан Толбачик попадают на продолжение этого разлома. Проекция на вертикальную плоскость гипоцентров землетрясений участка СФ зоны, включающего северную группу вулканов, образует вертикальный излом под вулканами Толбачик и Ключевской на глубинах 140–180 км. Возможно, здесь по краю слэба образовалась трещина, открывающая доступ вещества астеносферы из-под океанической плиты.

Полоса землетрясений для глубин 130–180 км перекрывает вулканический пояс, что можно объяснить присутствием на этом уровне зоны плавления пород океанической коры и мантийного клина с образованием первичной магмы.

На глубине 230–550 км происходит сравнительно немного событий и почти отсутству-

ют землетрясения $K \geq 14$. Слабая сейсмичность на этих глубинах обусловлена пониженной вязкостью мантии на этом интервале глубин, вследствие которой контакт плита–мантия носит пластический характер.

Глубже 550 км характеристики сейсмичности значительно меняются. Мощные землетрясения происходят на границе верхняя – нижняя мантия. Огромный рост суммарной энергии здесь обеспечен прежде всего за счет Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г.

Для объяснения представленных в статье данных предложена гипотеза влияния на глубинную сейсмичность Курило-Камчатского региона астеносферного течения из-под окраины Азии.

Список литературы

1. Гордеев Е.И., Федотов С.А., Чебров В.Н. **2013**. Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961–2011 гг.: основные результаты. *Вулканология и сейсмология*, 1: 3–18.
2. Федотов С.А., Кузин И.П., Бобков М.Ф. **1964**. Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961–1962 гг. *Изв. АН СССР. Сер. геофизическая*, 9: 1360–1375.
3. Кузин И.П. **1974**. Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. М.: Наука, 132 с.
4. Федотов С.А., Гусев А.А., Шумилина Л.С., Чернышова Г.В. **1985**. Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов в ней, связь с вулканизмом). *Вулканология и сейсмология*, 4: 91–107.
5. Федотов С.А., Шумилина Л.С., Чернышова Г.В. **1987**. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных исследований. *Вулканология и сейсмология*, 6: 29–61.
6. Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И., Леонов В.Л., Чебров В.Н. **2006**. Мелкофокусные землетрясения п-ова Камчатка. *Вулканология и сейсмология*, 3: 28–38. EDN: HTUGUR
7. Селиверстов Н.И. **2007**. Структура сейсмофокальной зоны Камчатки. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(9): 10–26. EDN: IAGJFB
8. Kanamori H., Anderson D.L. **1975**. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. of the Seismological Society of America*, 65: 1073–1095.
9. Allmann B.P., Shearer P.M. **2009**. Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 114, B01310. <https://doi.org/10.1029/2008jb005821>

10. Venkataraman A., Kanamori H.A. **2004.** Observational constraints on the fracture energy of subduction zone earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 109, B05302. <https://doi.org/10.1029/2003jb002549>
11. Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. **1995.** Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophysical Journal International*, 122(1): 108–124. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1995.tb03540.x>
12. Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. **2013.** Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. *Вулканология и сейсмология*, 1: 18–40. doi: 10.7868/S0203030613010021; EDN: PUASZB
13. Чеброва А.Ю., Чемарев Е.А., Матвеев Е.А., Чебров Д.В. **2020.** Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции. *Геофизические исследования*, 21(3): 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>; EDN: QQHRZU
14. Bondár I., Storchak D.A. **2011.** Improved location procedures at the International Seismological Centre. *Geophysical J. International*, 186: 1220–1244. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2011.05107.x>
15. Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. **1981.** Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4): 2825–2852. <https://doi.org/10.1029/jb086ib04p02825>
16. Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M. **2012.** The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
17. Федотов С.А. **1972.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 116 с.
18. Сергеев К.Ф. **1976.** Тектоника Курильской островной системы. М.: Наука, 239 с.
19. Балакина Л.М. **1983.** Землетрясения Тихого океана (пространственное расположение и процессы в очагах). *Геотектоника*, 5: 20–51.
20. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин И.Е. **2004.** Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 610 с.
21. Лобковский Л.И., Владимирова И.С., Габсатаров И.С., Гарагаш И.А., Баранов Б.В., Стеблов Г.М. **2017.** Постсейсмические движения после Симуширских землетрясений 2006–2007 гг. на различных стадиях сейсмического цикла. *Доклады Академии наук*, 473(3): 359–364.
22. Лобковский Л.И., Владимирова И.С., Алексеев Д.А., Габсатаров Ю.В. **2021.** Двухзвенная клавишно-блоковая модель генерации сильнейших субдукционных землетрясений. *Доклады Академии наук*, 496(1): 78–81.
23. Селиверстов Н.И. **2009.** Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 191 с.
24. Лобковский Л.И. **1988.** Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 251 с.
25. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. **1993.** Природа тектонической активности земли. М.: ВИНТИ, 291 с. (Итоги науки и техники, Физика земли).
26. Hess H.H. **1962.** History of the ocean basins. In: *Petrological Studies: A volume in honor of A.F. Buddington*. New York: Geological Society of America, p. 599–620. <https://doi.org/10.1130/petrologic.1962.599>
27. Добрецов Н.Л., Кидряшкин А.Г., Кидряшкин А.А. **2001.** Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 408 с.
28. Жарков В.Н. **2012.** Физика земных недр. М.: Наука и образование, 384 с.
29. Brudzinski M.R., Thurber C.H., Hacker B.R., Engdahl R. **2007.** Global prevalence of double Benioff zones. *Science*, 316(5830): 1472–1474. <https://doi.org/10.1126/science.1139204>
30. Hacker G.R., Peacock S.M., Aubers G.A., Holloway S.D. **2003.** Subduction factory 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B1): 2030–2046. <https://doi.org/10.1029/2001jb001129>
31. Адушкин В.В., Кочарян Г.Г. Павлов Д.В., Виноградов В.А., Гончаров А.И., Куликов В.И., Кулюкин А.А. **2009.** О влиянии сейсмических колебаний на развитие тектонических деформаций. *Доклады Академии наук*, 426(1): 98–100. EDN: KAVSSR
32. Кочарян Г.Г., Федоров А.Е. **1990.** Об особенностях механики сейсмического процесса в блочной геофизической среде. *Доклады Академии наук*, 315(6): 1345–1349.
33. Лыскова Е.Л. **2014.** Глубокофокусные землетрясения. В сб.: *Вопросы геофизики*, 47. СПб., с. 62–74. (Ученые записки СПбГУ; 447).
34. Диденко А.Н., Кузьмин М.И. **2018.** Глубокофокусные землетрясения: пространственное распределение, возможные причины и геодинамические следствия. *Геодинамика и тектонофизика*, 9(3): 947–965. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0378947>
35. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. **1979.** Палеогеодинамика. М.: Недра, 311 с.
36. Nelson T.H., Temple P.G. **1972.** Mainstream mantle convection: a geological analysis of plate motion.

- Bull. of the American Association of Petroleum Geologists (AAPG Bulletin)*, 56(2): 226–246. <https://doi.org/10.1306/819a3e54-16c5-11d7-8645000102c1865d>
37. Ito E., Sato H. **1991**. Aseismicity in the lower mantle by superplasticity of the descending slab. *Nature*, 351: 140–141. <https://doi.org/10.1038/351140a0>
 38. Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Гонтовая Л.И., Павленкова Г.А. **2018**. Глубинное строение и геодинамика Охотоморского региона. *Региональная геология и металлогения*, 76: 70–82. EDN: VRWIGX
 39. Лаверов Н.П., Лаппо С.С., Лобковский Л.И., Баранов Б.В., Кулинич Р.Г., Карп Б.Я. **2006**. Центральнo-Курильская «брешь»: строение и сейсмический потенциал. *Доклады Академии наук*, 408(6): 818–821. EDN: НТХVFT
 40. Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А. **1992**. *Введение в геодинамику*. М.: Наука, 192 с.
 41. Кононов М.В. **1989**. *Тектоника плит северо-запада Тихого океана*. М.: Наука, 169 с.
 42. Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В. **2011**. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии. *Геология и геофизика*, 52(6): 830–851.
- ## References
1. Gordeev E.I., Fedotov S.A., Chebrov V.N. **2013**. Detailed seismological investigations in Kamchatka during the 1961–2011 period: Main results. *Journal of Volcanology and Seismology*, 7: 1–15. <https://doi.org/10.1134/s0742046313010041>
 2. Fedotov S.A., Kuzin I.P., Bobkov M.F. **1964**. Detailed seismological studies in Kamchatka in 1961–1962. *Izv. USSR Academy of Sciences. Ser. Geophysical*, 9: 1360–1375. (In Russ.).
 3. Kuzin I.P. **1974**. [*Focal zone and structure of the upper mantle in the eastern Kamchatka region*]. Moscow: Nauka, 132 p. [In Russ].
 4. Fedotov S.A., Gusev A.A., Shumilina L.S., Chernyshova G.V. **1985**. Seismofocal zone of Kamchatka (geometry, location of sources in it, connection with volcanism). *Volcanology and Seismology*, 4: 91–107. (In Russ).
 5. Fedotov S.A., Shumilina L.S., Chernyshova G.V. **1987**. [Seismicity of Kamchatka and the Commander Islands based on detailed studies]. *Volcanology and Seismology*, 6: 29–61. (In Russ).
 6. Gordeev E.I., Gusev A.A., Levina V.I., Leonov V.L., Chebrov V.N. **2006**. Shallow earthquakes of the Kamchatka Peninsula. *Journal of Volcanology and Seismology*, 3: 28–38. (In Russ.). EDN: HTUGUR
 7. Seliverstov N.I. **2007**. Structure of Kamchatka seismofocal zone. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, 1(9): 10–26. (In Russ.).
 8. Kanamori H., Anderson D.L. **1975**. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. of the Seismological Society of America*, 65: 1073–1095.
 9. Allmann B.P., Shearer P.M. **2009**. Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 114, B01310. <https://doi.org/10.1029/2008jb005821>
 10. Venkataraman A., Kanamori H.A. **2004**. Observational constraints on the fracture energy of subduction zone earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 109, B05302. <https://doi.org/10.1029/2003jb002549>
 11. Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. **1995**. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel-times. *Geophysical Journal International*, 122(1): 108–124. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1995.tb03540.x>
 12. Chebrov V.N., Droznin D.V., Kugaenko Yu.A., Levina V.I., Senyukov S.L., Sergeev V.A., Shevchenko Yu.V., Yashchuk V.V. **2013**. The system of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011. *Journal of Volcanology and Seismology*, 7(1): 16–36. <https://doi.org/10.1134/s0742046313010028>
 13. Chebrova A.Yu., Chemarev E.A., Matveenko E.A., Chebrov D.V. **2020**. Seismological data information system in Kamchatka Branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions. *Geofizicheskie issledovaniya*, 21(3): 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
 14. Bondár I., Storchak D.A. **2011**. Improved location procedures at the International Seismological Centre. *Geophysical J. International*, 186: 1220–1244. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2011.05107.x>
 15. Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. **1981**. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4): 2825–2852. <https://doi.org/10.1029/jb086ib04p02825>
 16. Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M. **2012**. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
 17. Fedotov S.A. **1972**. *Energy classification of Kuril-Kamchatka earthquakes and the problem of magnitudes*. Moscow: Nauka, 116 p. (In Russ).
 18. Sergeev K.F. **1976**. *Tectonics of the Kuril island system*. Moscow: Nauka, 239 p. (In Russ.).
 19. Balakina L.M. **1983**. Earthquakes of the Pacific Ocean (spatial location and source processes). *Geotectonics*, 5: 20–51.
 20. Lobkovskii L.I., Nikishin A.M., Khain I.E. **2004**. *Modern problems of geotectonics and geodynamics*. Moscow: Nauchnyi mir, 610 p. (In Russ.).
 21. Lobkovskii L.I., Vladimirova I.S., Gabsatarov I.S., Garagash I.A., Baranov B.V., Steblou G.M. **2017**. Post-

- seismic motions after the 2006–2007 Simushir earthquakes at different stages of the seismic cycle. *Doklady Earth Sciences*, 473: 375–379. <https://doi.org/10.1134/s1028334x17030266>
22. Lobkovskii L.I., Vladimirova I.S., Alekseev D.A., Gabsatarov Yu.V. **2021**. Two-element keyboard model of generation of the strongest subduction earthquakes. *Doklady Earth Sciences*, 496: 72–75. <https://doi.org/10.1134/s1028334x2101013x>
 23. Seliverstov N.I. **2009**. *Geodynamics of the junction zone of the Kuril-Kamchatka and Aleutian island arcs*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Publ. House of Vitus Bering Kamchatka State University, 191 p. (In Russ.).
 24. Lobkovskii L.I. **1988**. *Geodynamics of spreading zones, subduction zones and two-tier plate tectonics*. Moscow: Nauka, 252 p. (In Russ.).
 25. Sorokhtin O.G., Ushakov S.A. **1993**. [*The nature of tectonic activity of the Earth*]. Moscow: VINITI, 291 p. (Results of science and technology. Physics of the Earth). (In Russ.).
 26. Hess H.H. **1962**. History of the ocean basins. In: *Petrological Studies: A volume in honor of A.F. Buddington*. New York: Geological Society of America, p. 599–620. <https://doi.org/10.1130/petrologic.1962.599>
 27. Dobretsov N.L., Kidryashkin A.G., Kidryashkin A.A. **2001**. *Deep geodynamics*. Novosibirsk: Publ. House of the Siberian Branch of RAS, 408 p. (In Russ.).
 28. Zharkov V.N. **2012**. *Physics of the Earth's interior*. Moscow: Nauka i obrazovanie, 384 p. (In Russ.).
 29. Brudzinski M.R., Thurber C.H., Hacker B.R., Engdahl R. **2007**. Global prevalence of double Benioff zones. *Science*, 316(5830): 1472–1474. <https://doi.org/10.1126/science.1139204>
 30. Hacker G.R., Peacock S.M., Aubers G.A., Holloway S.D. **2003**. Subduction factory 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B1): 2030–2046. <https://doi.org/10.1029/2001jb001129>
 31. Adushkin V.V., Kocharyan G.G., Pavlov D.V., Vinogradov V.A., Goncharov A.I., Kulikov V.I., Kulyukin A.A. **2009**. Influence of seismic vibrations on the development of tectonic deformations. *Doklady Earth Sciences*, 426(1): 588–590. <https://doi.org/10.1134/s1028334x09040175>
 32. Kocharyan G.G., Fedorov A.E. **1990**. On the mechanics of the seismic process in a blocky geophysical medium. *Dokl. Akademii nauk SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 315(6): 1345–1349. (In Russ.).
 33. Lyskova E.L. **2014**. Deep focus earthquakes. In: *Voprosy geofiziki*, 47. Saint Petersburg, p. 62–74. (In Russ.).
 34. Didenko A.N., Kuzmin M.I. **2018**. Deep focus earthquakes: spatial distribution, possible causes and geodynamic consequences. *Geodynamics and Tectonophysics*, 9(3): 947–965. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0378947>
 35. Zonenshain L.P., Kuzmin M.I. **1979**. *Paleogeodynamics*. Moscow: Nedra, 311 p. (In Russ.).
 36. Nelson T.H., Temple P.G. **1972**. Mainstream mantle convection: a geological analysis of plate motion. *Bull. of the American Association of Petroleum Geologists (AAPG Bulletin)*, 56(2): 226–246. <https://doi.org/10.1306/819a3e54-16c5-11d7-8645000102c1865d>
 37. Ito E., Sato H. **1991**. Aseismicity in the lower mantle by superplasticity of the descending slab. *Nature*, 351: 140–141. <https://doi.org/10.1038/351140a0>
 38. Pavlenkova N.I., Kashubin S.N., Gontovaya L.I., Pavlenkova G.A. **2018**. Deep structure and geodynamics of the Sea of Okhotsk region. *Regional Geology and Metallogeny*, 76: 70–82. (In Russ.).
 39. Laverov N.P., Lappo S.S., Lobkovsky L.I., Baranov B.V., Kulinich R.G., Karp B.Ya. **2006**. The Central Kuril “gap”: structure and seismic potential. *Doklady Earth Sciences*, 409(5): 787–790.
 40. Zonenshain L.P., Savostin L.A. **1992**. *Introduction to geodynamics*. Moscow: Nauka, 192 p. (In Russ.).
 41. Kononov M.V. **1989**. [*Plate tectonics of the Northwest Pacific*]. Moscow: Nauka, 169 p. (In Russ.).
 42. Kulakov I.Yu., Dobretsov N.L., Bushenkova N.A., Yakovlev A.V. **2011**. Slab shape in subduction zones beneath the Kurile-Kamchatka and Aleutian arcs based on regional tomography results. *Russian Geology and Geophysics*, 52(6): 830–851.

Об авторе

Шевченко Юрий Валентинович (<https://orcid.org/0009-0005-5992-9724>), начальник сектора метрологии, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), Петропавловск Камчатский, Россия, klb@emsd.ru

Поступила 21.11.2024

Принята к публикации 12.02.2025

About the Author

Shevchenko, Yury V. (<https://orcid.org/0009-0005-5992-9724>), Head of the metrology sector, the Kamchatka Branch of the Federal Research Center “Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences” (KB FRC GS RAS), Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, klb@emsd.ru

Received 21 November 2024

Accepted 12 February 2025