

УДК 550.34

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ ПАРАМЕТР V_p/V_s ЮЖНОГО СЕГМЕНТА КАМЧАТСКОЙ СЕЙСМОФОКАЛЬНОЙ ЗОНЫ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 25 МАРТА 2020 г., $M_w = 7.5$ И РАЗВИТИИ ЕГО АФТЕРШОКОВОГО ПРОЦЕССА

© 2022 г. М. С. Кучай^а, *, Л. Б. Славина^а, **

^аИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

*e-mail: kuchay@ifz.ru

**e-mail: slavina@ifz.ru

Поступила в редакцию 22.02.2021 г.

После доработки 26.10.2021 г.

Принята к публикации 27.06.2022 г.

Мониторинг кинематического параметра V_p/V_s для Камчатской фокальной зоны осуществляется в течение длительного времени, носит регулярный характер. Это позволило оценить поведение параметра и выявить его особенности в период подготовки и развитии очагового процесса землетрясения 25 марта 2020 г., произошедшего на Тихоокеанской плите, в области контакта Тихоокеанской плиты с континентальным склоном Камчатки. Землетрясение 25 марта 2020 г. с магнитудой такого уровня ($M_L = 7.6$, $M_w = 7.5$) является достаточно редким событием на Тихоокеанской плите. Для уточнения особенностей строения среды в области возникновения землетрясения привлечены результаты работ по методу ГСЗ и НСП, имевшие место в этом районе ранее. В результате исследований показано, что очаг землетрясения расположен в области перегиба погружающейся Тихоокеанской плиты. Очаговая область приурочена к слою на границе коры и мантии с астеносферой. Слой располагается на глубине 30–60 км, с пониженными значениями скорости волн V_p и V_s . Для области перегиба плиты вдоль Камчатки характерны пониженные значения V_p/V_s , что свидетельствует о процессе растяжения вдоль плиты. Очаг возник на участке сочленения погружающейся Тихоокеанской плиты под южное окончание Камчатки и Северных Курильских островов, а также и Охотоморской плиты. На этом участке наблюдается резкая смена аномальных значений параметра с пониженных значений – на повышенные, характерные для процесса сжатия. Исследования позволили оценить возможные области растяжения и сжатия геологической среды.

Ключевые слова: скорости сейсмических волн, параметр V_p/V_s , зона субдукции, очаг землетрясения, Тихоокеанская плита

DOI: 10.31857/S0203030622050066

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясение 25 марта 2020 г., $M_L = 7.6$, $M_w = 7.5$ произошло на Тихоокеанской плите, юго-восточнее Камчатского мыса Лопатка, к востоку от Северных Курильских островов Парамушир, Онекотан. Это область так называемого перегиба плиты – начала погружения Тихоокеанской плиты под Камчатку, начала формирования погружающегося фокального слоя – слоя субдукции.

Из сообщения Камчатского Федерального Центра Прогноза Землетрясений (ФЦПЗ): “25 марта 2020 г. в 02:49 UTC в районе Северных Курильских островов (48.93 N, 157.89 E) на глубине $H = 79$ км произошло землетрясение с $M_L = 7.6$, $M_S = 7.1$ ($M_w = 7.5$, NEIC), вызвавшее сотрясения интенсивностью до 6–7 баллов в г. Северо-Курильске, до 6 баллов в г. Вилючинске, до 5 баллов

в г. Петропавловке-Камчатском по шкале MSK-64. Землетрясение сопровождается афтершоковым процессом. В течение ближайшей недели в окрестности произошедшего землетрясения будут происходить более слабые, но ощутимые события. Сотрясения в г. Северо-Курильске могут достигать 7 баллов, а в г. Петропавловске-Камчатском 5 баллов”.

Землетрясение привлекло внимание ряда исследователей [Акопян, 2020; Лутиков и др., 2021].

Наблюдения за поведением параметра V_p/V_s для Камчатской фокальной зоны производится длительное время и носит регулярный характер. Ведется мониторинг параметра в режиме близком к реальному времени, по ежедневному получаемым данным из КФ ФИЦ ЕГС РАН в ИФЗ РАН. Результатом непрерывного мониторинга параметра, осуществляемым в ИФЗ по данным КФ, являются за-

ключения еженедельно, с оценкой вероятности возникновения сильного события, направляемые в ФЦПЗ КФ. Карты распределения параметра и заключение о возможности возникновения сильного события в этом районе было направлено в ФЦПЗ КФ 19.03.2020 и 24.03.2020.

В последние годы в области погружения Тихоокеанской плиты под Камчатку (области перегиба) наблюдается сейсмическая активизация. Так, на СЗ в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг, 20 декабря 2018 г. произошло сильное землетрясение ($M_w = 7.3$), названное землетрясением “Углового поднятия”, афтершоки которого продолжаются до сего дня, что можно видеть на рис. 1 [Чебров и др., 2020; Кучай и др., 2020].

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРА V_p/V_s

Параметр V_p/V_s рассчитывается по данным времен пробега Р- и S-волн, и их разности S–P от землетрясений, зарегистрированных сетью телеметрических сейсмических станций КФ ФИЦ ЕГС РАН. Анализ распределения параметра рассматривался за длительный период времени, с 2009 г. по июнь 2020 г.

Единичные значения параметра рассчитываются аналитически по формуле:

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

где T_{S-P} – разность времен вступления Р- и S-волн на конкретной станции от i -ого землетрясения, T_0 – время в очаге, T_p – время вступления Р-волны, соответственно $T_p - T_0$ – время пробега Р-волны. Затем для каждого события рассчитывались осредненные по группе станций значения параметра V_p/V_s . Полученное значение приписывается положению гипоцентра. Таким образом, можно изучать пространственно-временное распределение указанного параметра и делать заключения о напряженно-деформированном состоянии геологической среды [Славина, Мячкин, 2005].

Параметр отношение скоростей V_p/V_s определяется упругими свойствами среды и может быть выражен через коэффициенты Ламе μ , λ . Когда упругие параметры Ламе μ , λ равны, V_p/V_s равно корню из 3, т.е. ~ 1.73 . Значения, равные 1.73 ± 0.05 , считались нормальными для исследуемой геологической среды. Появление пониженных и повышенных значений свидетельствуют об изменении состояния геологической среды, состава, физических параметров – температуры, давления, а также напряженного состояния. Пониженные значения указывают на развитие процессов растяжения, дилатансии в среде, повышенные – на процесс сжатия, компакссии [Николаевский, 1996; Гарагаш, Хайдаров, 1989; Гарагаш, 1983].

В работе строились карты пространственно-временного распределения землетрясений, вертикальные разрезы в плоскости XZ, при этом значения параметра V_p/V_s кодировались цветом.

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В сейсмотектоническом плане область возникновения землетрясения 25 марта 2020 г. достаточно сложно построена. Это район сочленения погружающейся Тихоокеанской плиты с Южным сегментом Камчатской фокальной зоны и фокальной зоной Курильской островной дуги, с образованием глубоководного желоба [Гнебиденко и др., 1983; Геология СССР, 1964].

Район исследования с положением главного толчка землетрясения показан на рис. 1.

Показано распределение параметра V_p/V_s региональных землетрясений Камчатской сейсмофокальной зоны, включая район Северных Курильских островов, зарегистрированных на 29.02.2020 (период 30 дней) КФ ФИЦ ЕГС РАН. Звездочкой указано положение главного толчка очага землетрясения 25.03.2020 и его механизм по данным NEIC. Раскраска очагов землетрясений по параметру V_p/V_s , размер кружка в соответствии энергетическим классом землетрясения по С.А. Федотову.

Можно видеть, что в фокальном слое, при погружении под Камчатку, вдоль материкового склона желоба, вдоль восточных полуостровов Камчатки наблюдаются пониженные значения параметра V_p/V_s . Пониженные значения также наблюдаются на океаническом склоне, в области перегиба Тихоокеанской плиты, включая очаговую область землетрясения “Углового поднятия” на северо-западе плиты. Анализ распределения параметра V_p/V_s при подготовке землетрясения “Углового поднятия” и развитии его афтершокового процесса приведен в работе М.С. Кучая с соавторами [Кучай и др., 2020].

В районе очага землетрясения 25.03.2020 наблюдается смена знака параметра с пониженных значений – на повышенные. Это явление можно наблюдать как для очагов слабых региональных землетрясений, так и осредненного поля.

На карте (см. рис. 1) цветом показаны глубины поверхности дна океана Тихоокеанской плиты. Положение главного толчка четко свидетельствуют о приуроченности землетрясения к Тихоокеанской плите, к области начала ее погружения под Камчатку.

Исследования рельефа дна и строения верхней части разреза, осадков и коры, на Тихоокеанской плите и вдоль берегов Камчатки проводились методом Непрерывного сейсмического профилиро-

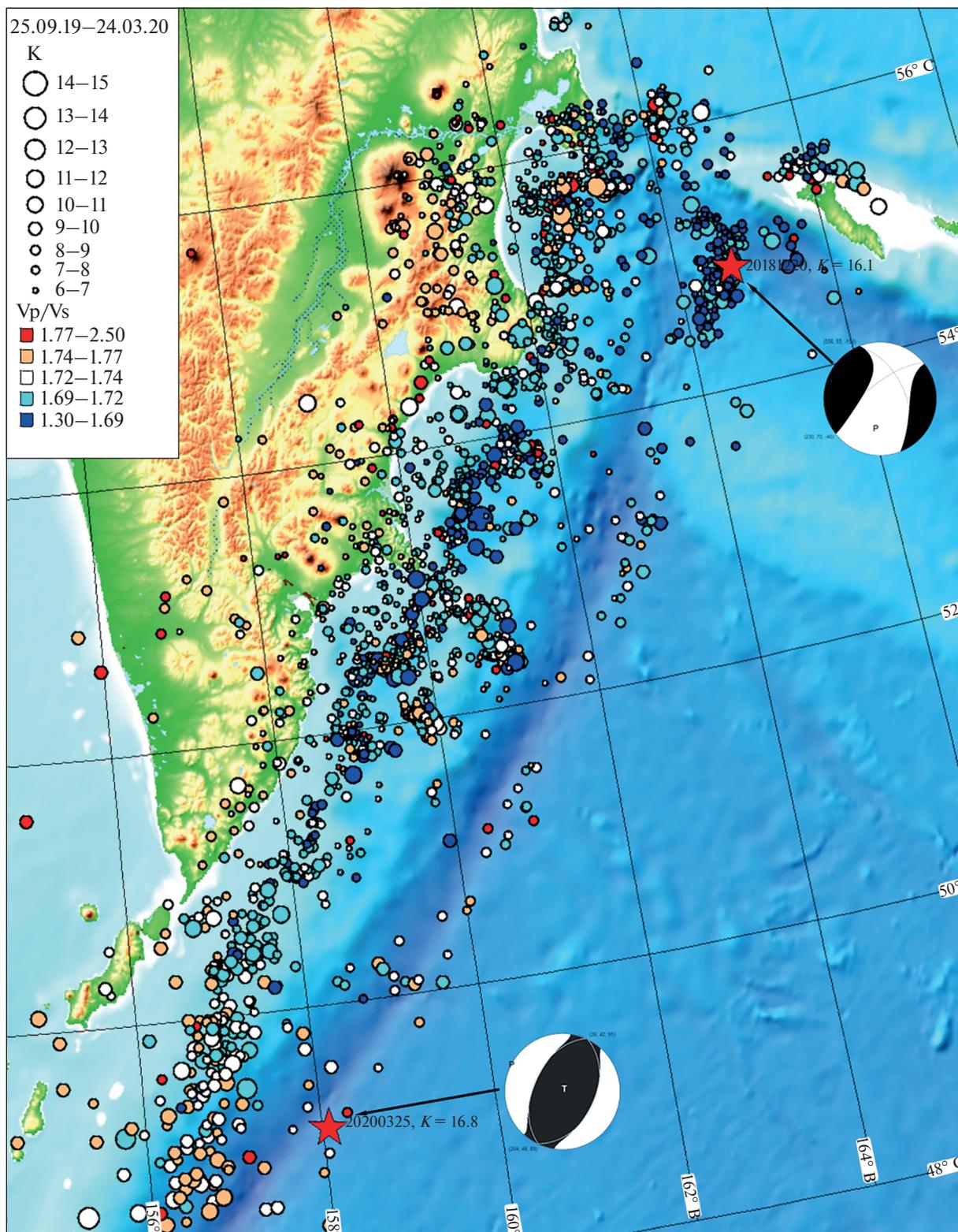


Рис. 1. Карта района исследования с положением очага главного толчка землетрясения 25.03.2020 на фоне распределения региональных землетрясений, зарегистрированных КФ ФИЦ ЕГС на 29.02.2020 (период 30 дней). Раскраска поля и очагов землетрясений по параметру V_p/V_s (см. условные обозначения). Механизм очага – по данным NEIC. Показан также очаг землетрясения “Углового поднятия” и его механизм по NEIC.

вания (НСП). Рассмотрим более подробно рельеф и строение верхней части разреза как океанического, так и материкового склона желоба по данным НСП.

Результаты и схема отработанных профилей, изложены в работах Н.И. Селиверстова [1998, 2009, 2013]. На рис. 2 показаны разрезы по двум из них, 6 и 7, отработанных вблизи очаговой зоны землетрясения.

На этом участке дуги глубина Курило-Камчатского желоба возрастает до величины 7800 м. По данным Н.И. Селиверстова в пределах глубоководного желоба по морфологическим признакам различаются два типа внешнего (океанического) склона, которые можно условно назвать “склоны растяжения” и “склоны сжатия”. Первый тип склона (“склон растяжения”) характеризуется сравнительно небольшими углами наклона и развитием “обратных” ступеней (обращенных уступами вверх по склону). Второй тип склона (“склон сжатия”) характеризуется значительным (4° – 5°) наклоном и развитием “нормальных” ступеней (обращенных уступами к желобу). Происхождение ступеней внешнего склона, по мнению Н.И. Селиверстова [2013], связано с заложением в верхней части литосферной плиты системы раздвигов при ее изгибе, и последующей деформацией (изгибом) призматических литосферных блоков под действием собственного веса в направлении к желобу на “склонах растяжения”. Под действием значительного по величине горизонтального сжатия в направлении от желоба на “склонах сжатия”. На рассматриваемом участке Тихоокеанской плиты и к югу от него в Курило-Камчатском желобе преобладает первый тип внешнего склона – “склон растяжения”, среди которых преобладают “обратные”, т.е. ступени, обращенные уступами вверх по склону.

Землетрясение приурочено к одной из ступеней характерных для этого участка погружающейся Тихоокеанской плиты.

Мощность осадочного чехла на океаническом склоне желоба и прилегающем участке Тихоокеанской плиты, не превышает 0.5–0.6 км. “Склон сжатия” наблюдается лишь на СЗ Тихоокеанской плиты, в районе сочленения структуры глубоководного желоба с возвышенностью Обручева. Перед вхождением в зону субдукции, литосферная плита изгибается. При этом, верхняя часть плиты испытывает растяжение. В результате, в самой верхней части литосферы (первые 8–10 км) образуются магистральные разрывы (раздвижки), которые на более значительных глубинах сменяются сначала зонами трещиноватости, а затем (до глубин 30–35 км) – зонами раскрытия пор.

Заметим, что наличие “склонов растяжения” Н.И. Селиверстов не связывает с отсутствием обстановки горизонтального сжатия вкост

ветствующих участков дуги. Видимо, этого сжатия недостаточно, чтобы обеспечить изгиб “каменной лестницы” литосферных блоков в обратном направлении, как это предполагается для “склонов сжатия”.

Механизм землетрясения 25.03.2020 по данным NEIC, приведенный на рис. 1, рис. 3 – взброс, соответствует описанной выше “обратной” ступени, с признаками растяжения. Азимут оси растяжения $T = 81^{\circ}$, т.е. в направлении на СВ, вдоль краевого вала погружения плиты (вал Зенкевича). Угол падения – 88° . Ось сжатия P – вкост желоба, азимут 292° , угол падения 2° , т.е. почти горизонтально. Развитие афтершокового процесса, рассмотренный ниже, подтверждает полученный механизм.

Поведение параметра V_p/V_s в области “перегиба” Тихоокеанской плиты, ее океанического борта, так и в области погружения фокального слоя под Камчатку, под материковый борт желоба, можно видеть на рис. 3. Пониженные значения параметра, в основном, наблюдаются в районе Камчатских полуостровов, т.е. в погружающемся фокальном слое со стороны материкового склона желоба (см. рис. 3б). Интерес представляет наблюдающаяся резкая смена “знака” параметра с пониженных значений на повышенные к югу от о. Парамушир, в области сочленения Камчатки с Курильской островной дугой (см. рис. 3а, 3б). Эту зону можно также рассматривать как сложную область сочленения, взаимодействия Тихоокеанской плиты – Курило-Камчатской островной дуги и Охотоморской плиты. На Тихоокеанской плите, в очаговой области афтершоков землетрясения 25.03.2020 можно видеть группирование слабо повышенных значений, с незначительным количеством пониженных значений с восточной стороны (см. рис. 3а). Описание развития афтершокового процесса рассмотрено ниже.

Характер распределения параметра в области взаимодействия плит Тихоокеанской, Охотоморской и Курило-Камчатской островной дуги заслуживает более пристального внимания. Рассмотрено распределения параметра V_p/V_s за длительный период времени, с 2009 г. по 25.03.2020 г. (до землетрясения). Период времени ограничен имеющимися однородными данными региональных землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН, единообразно обработанными по программе DIMAS [Дрознин, Дрознина, 2010]. Построено распределение параметра в зоне сейсмической активизации области перехода от Тихоокеанской плиты к Курильскому о. Парамушир, по площади, по глубине на разрезе, секущем область перехода вкост простираения дуги (рис. 4). Рассматривались землетрясения за период времени 2009–25.03.2020 (до землетрясения) окраска эпицентров по параметру V_p/V_s . Область, к которой относится карта

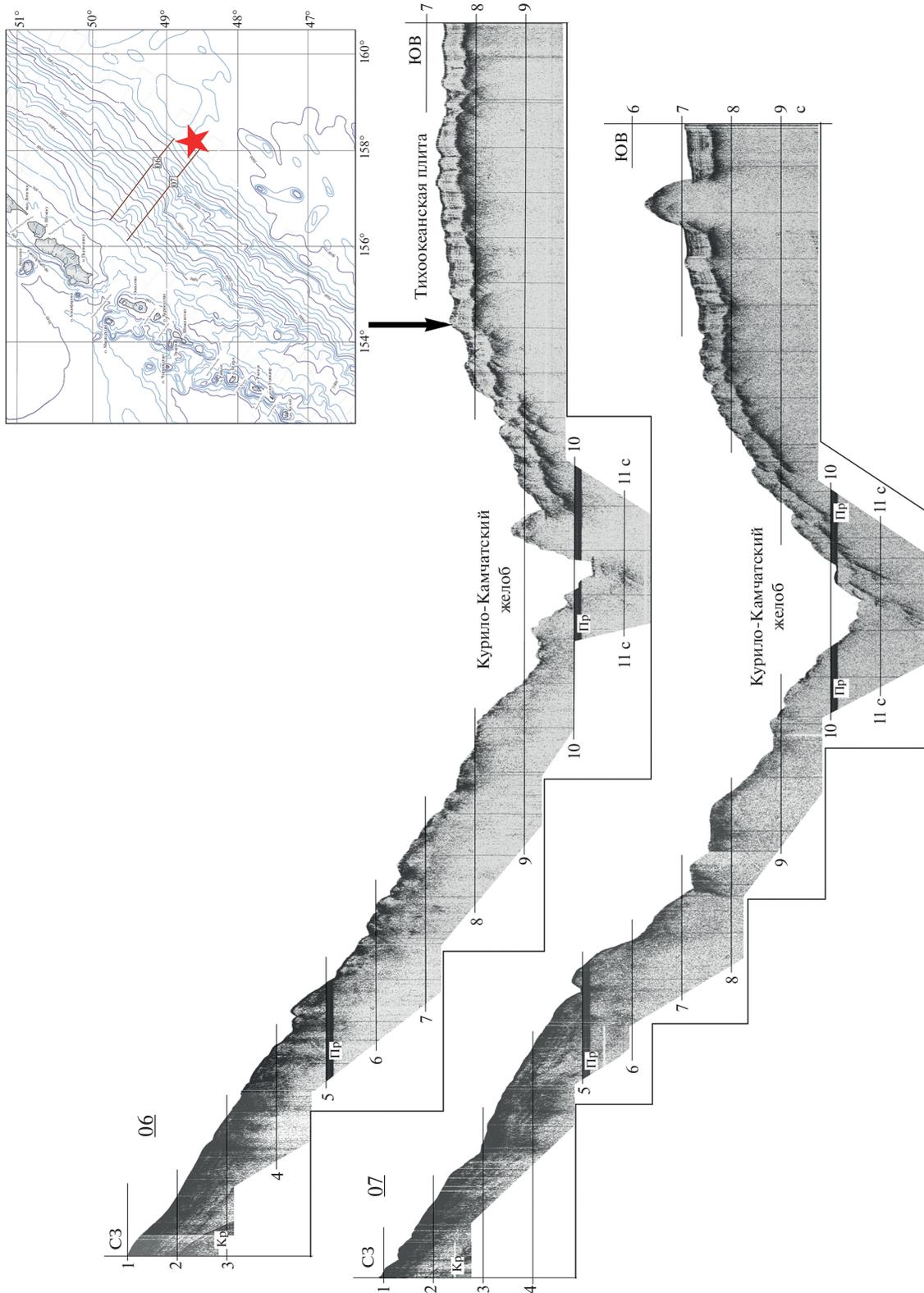


Рис. 2. Акустические разрезы методом Непрерывного сейсмического профилирования (НСП) в районе юга Камчатки и Северных Курильских островов. Положение линий разрезов показано на врезке. Стрелкой на разрезе 6 показано положение Главного толчка землетрясения 25.03.2020. На разрезах показано удвоенное время, туда и обратно, в секундах, скорость распространения волны ~1.8 км/с.

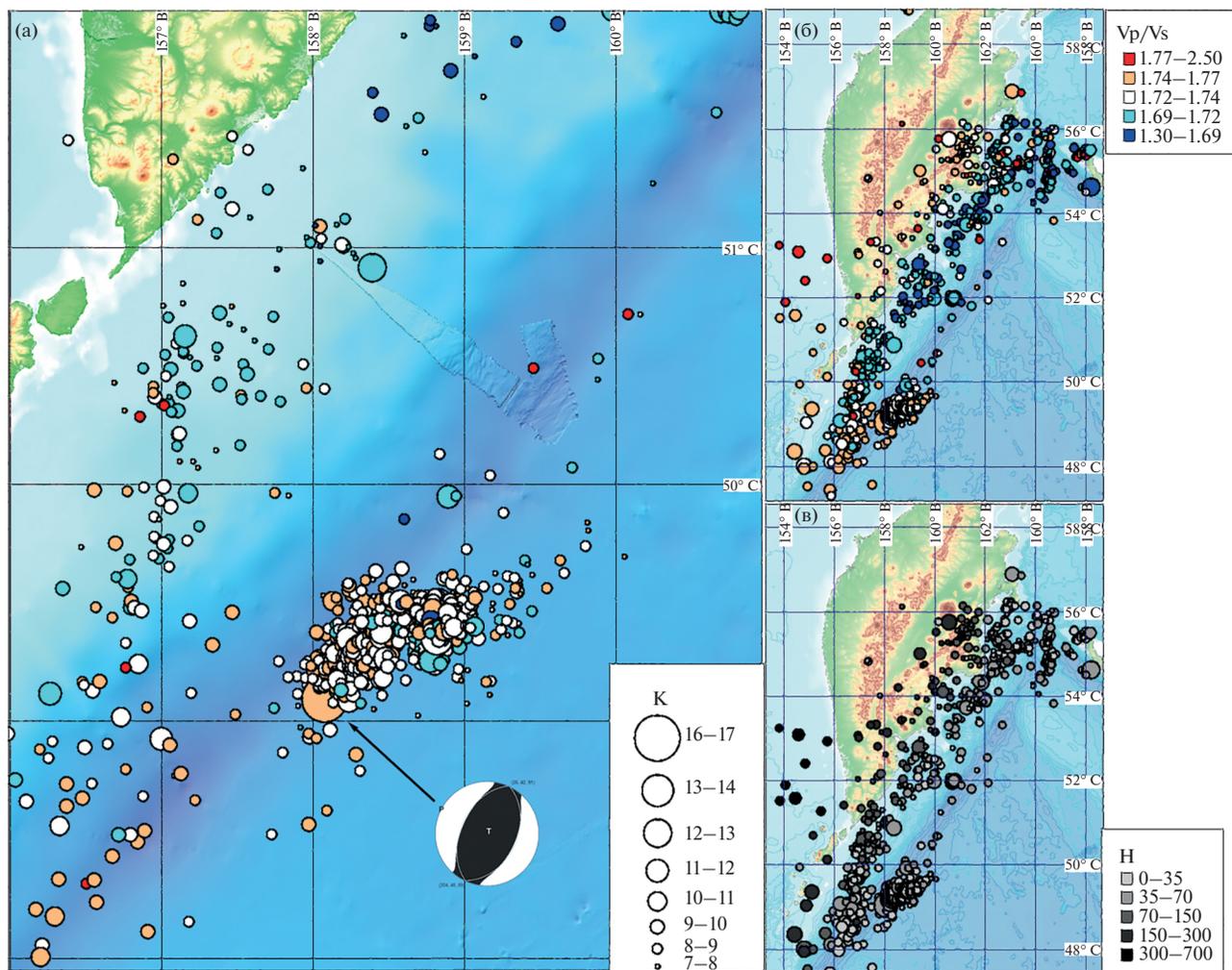


Рис. 3. Карты района и положение очаговой области землетрясения 25.03.2020.

Показаны распределения региональных землетрясений по площади (а), по параметру V_p/V_s (б), по глубине (в), зарегистрированных КФ ФИЦ ЕГС в Камчатской фокальной зоне за период 30 дней. Раскраска очагов землетрясений — по V_p/V_s и глубине согласно условным обозначениям. Механизм очага — по данным NEIC.

распределения параметра по площади, показана квадратом на врезке рис. 4. Разрез демонстрирует положение и наклон фокального слоя. Также показан профиль глубин погружения дна Тихого океана, подъем к Курильской островной дуге, о. Парамушир и погружение в Охотское море.

Поле параметра V_p/V_s за длительный период времени также показывает, что в этой сложно построенной в тектоническом отношении области наблюдается смена знака параметра с пониженных значений на повышенные.

Проведена оценка значимости смены знака параметра V_p/V_s в области сочленения плит. Для чего посчитаны и построены нормированные графики распределения параметра V_p/V_s для фокальной зоны юга Камчатки и фокальной зоны севера Курильских островов на широте о. Онекотан на приведенном ниже графике нормирован-

ного распределения параметра V_p/V_s выборки землетрясений из трех ограниченных координатами выделенных зон. Можно видеть, что область в интервале координат 47–49 с.ш., 155–158 в.д. имеет максимум распределения на значении V_p/V_s — 1.75. В то же время кривая для юга Камчатки в интервале координат 49–51 с.ш., 156–159 в.д. имеет двугорбую форму и максимумы на значениях V_p/V_s — 1.69 и 1.71 (рис. 5).

Сильное землетрясение произошло в градиентной зоне “смены знака” параметра от пониженных значений к слабо повышенным значениям.

ПРОЦЕСС РАЗВИТИЯ ОЧАГОВОЙ ОБЛАСТИ И АФТЕРШОКОВ

Рассмотрим более подробно заполнение очаговой области афтершоками. Отражение разви-

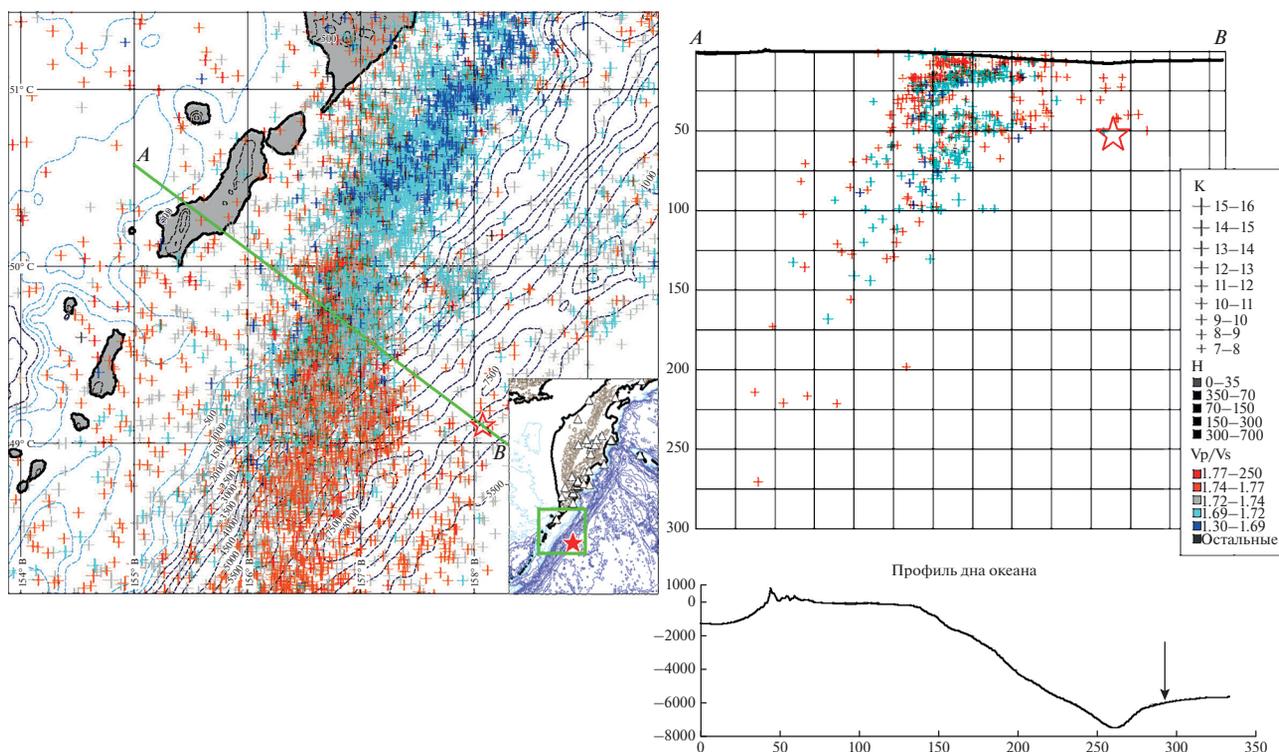


Рис. 4. Распределение землетрясений за период времени 2009–25.03.2020 (до землетрясения) области перехода от Тихоокеанской плиты к Курильскому о. Парамушир и Охотоморской плите, с окраской в соответствии со значениями параметра V_p/V_s по площади. На разрезе – по глубине, секущем вкrest простираения зон сейсмической активизации (шаг сетки на разрезе – 25 км). Данные КФ ФИЦ ЕГС. Показан профиль глубин дна океана в изобатах. Положение главного толчка показано звездами и стрелкой. На врезке показан район выбранного профиля.

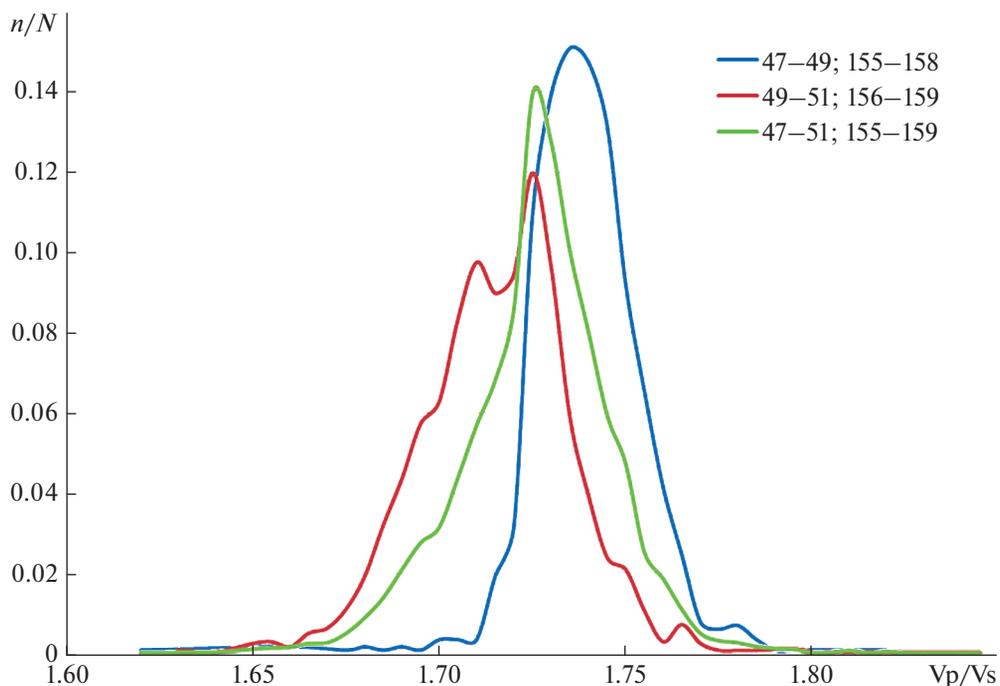


Рис. 5. Нормированные графики распределения параметра V_p/V_s для трех выделенных по координатам зон: фокальной зоны юга Камчатки и фокальной зоны севера Курильских островов на широте о. Онекотан.

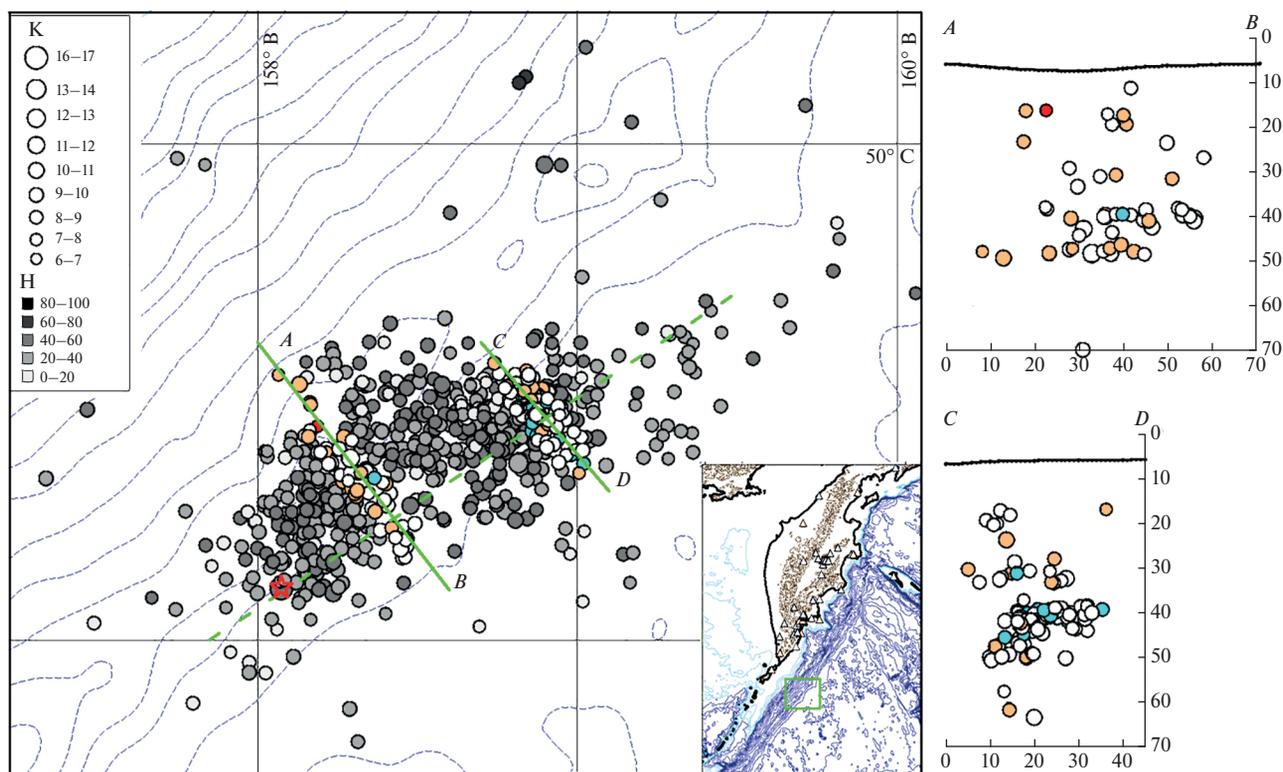


Рис. 6. Карта распределения афтершоков по глубине в очаговой области. Разрезы вкрест распределения афтершоков, окраска гипоцентров на разрезах в соответствии с параметром V_p/V_s (см. условные обозначения рис. 3).

тия очагового процесса во времени и по глубине по параметру V_p/V_s показано на рис. 6, 7.

На приведенной карте и разрезах вкрест простираения очаговой области можно видеть, что афтершоки развивались по разрыву ЮЗ–СВ простираения (см. рис. 1, механизм очага). Длина разрыва порядка 90–100 км, что соответствует указанной магнитуде. Интерес представляет тот факт, что разрыв, судя по афтершокам, распространялся только в одном направлении от главного толчка, на СВ вдоль области сгиба плиты. Окраска гипоцентров в соответствии с глубиной (см. рис. 6) свидетельствует о приуроченности афтершоков в основном к слою 20–50 км. Построены разрезы, пересекающие очаговую область вкрест простираения афтершоков в средней части профиля АВ и в СВ части профиль CD.

На разрезах также можно видеть распределение по глубине. На СЗ конце профиля глубины от ~15–20 км, далее небольшой наклон в ЮВ направлении, заглубление до 50–60 км, т.е. вглубь Тихоокеанской плиты. Параметр слабо повышенный. На СВ профиле CD есть пониженные значения.

Развитие процесса заполнения очаговой области отслеживалось по времени — за первые часы (рис. 7), сутки, двое суток и три дня. Распреде-

ние афтершоков показано на картах (в плане), по глубине на разрезах, с окраской по параметру V_p/V_s (рис. 8).

Сравнивая заполнение очаговой области, распределение афтершоков в течение трех суток можно утверждать, что разрыв сформировался в первые сутки в слое, на глубинах 30–50 км. В дальнейшем, происходило заполнение очаговой области афтершоками, при некотором всплывании афтершоков по глубине. Окраска по параметру сохранялась. На северо-восточном крыле разлома преобладали пониженные значения, т.е. растяжение. На ЮЗ крыле слабо положительные значения, т.е. сжатие.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные результаты распределения параметра V_p/V_s , как на Тихоокеанской плите, в очаговой области сильного события, так и в фокальной зоне в области сочленения Тихоокеанской и Охотоморской плит, свидетельствуют об информативности параметра о состоянии геологической среды.

Пониженные значения, наблюдаемые вдоль линии изгиба Тихоокеанской плиты, могут сви-

Землетрясение 25.03.2020

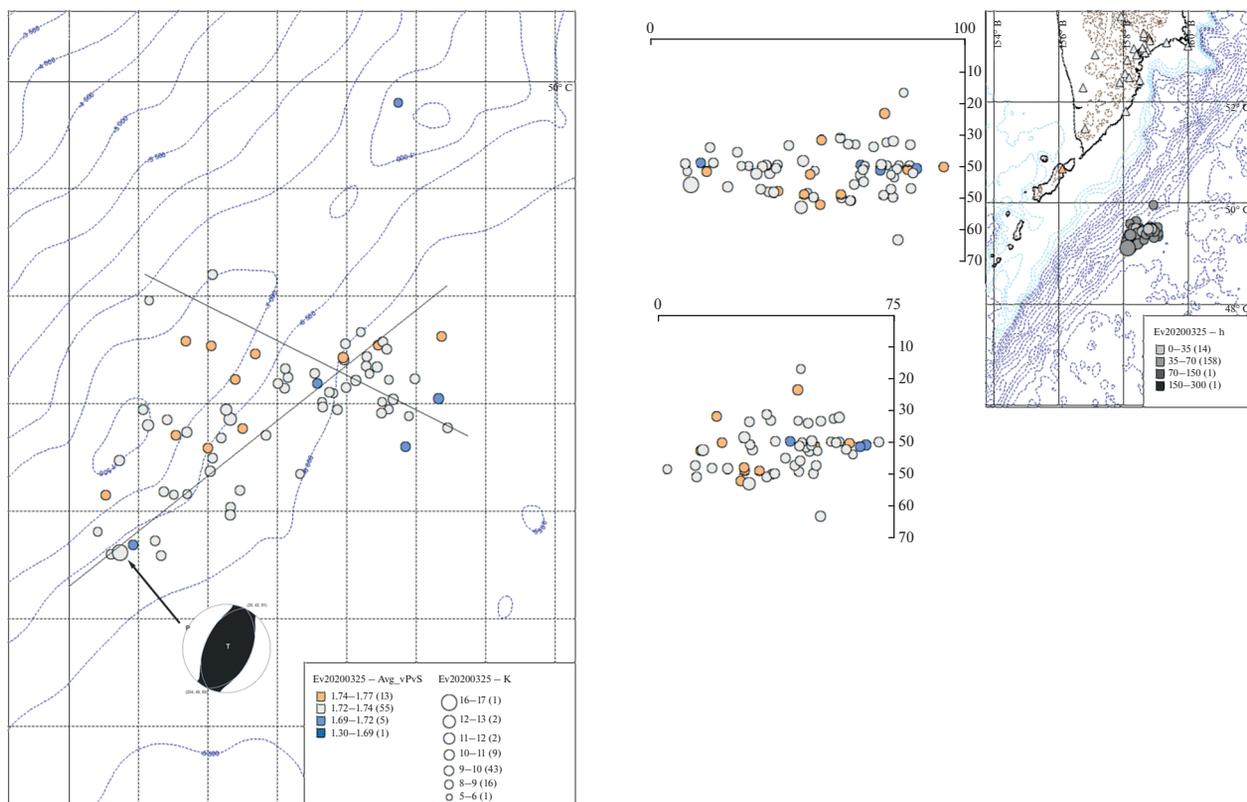


Рис. 7. Распределение афтершоков землетрясения 25.03.2020 по площади и глубине: первые часы 25.03.2020.

детельствовать о растяжении — дилатансии испытываемые Тихоокеанской плитой.

Уместно рассмотреть положение очаговой области исследуемого землетрясения и строение геологической среды на стыке таких значимых структур в тектоническом плане по данным работ методом Глубинного сейсмического зондирования — ГСЗ [Балеста, 1981; Глубинное сейсмическое ..., 1978].

Методом ГСЗ в этом районе были отработаны длинные профили 7-ОС — Тихоокеанская плита — Камчатка и 9-0 в направлении Тихоокеанская плита — Северные Курильские о-ва.

На разрезе показаны выделенные по ГСЗ горизонты и границы в коре и мантии, граница Мохорвичича — М, астеносферный слой пониженных скоростей. Указаны скорости распространения волн по данным ГСЗ и полученные по данным землетрясений. Погружающийся фокальный слой с землетрясениями. Положение на разрезе очаговой области землетрясения 25.03.2020 показано условно.

В соответствии с данными КФ и NEIC очаг землетрясения располагается на глубинах ~30–50 км, т.е. в соответствии с данными ГСЗ, приведенными на рис. 9, на границе “коромантийного” слоя и астеносферы. Значения скорости

V_p в мантии в пределах 8.2 км/с, в астеносфере — пониженные скорости до 7.4–7.7 км/с. Плотности в мантии — 3.2–3.3 кг/м³, в астеносфере — 3.13 кг/м³. Геофизические характеристики, приведенные на разрезе рис. 7, свидетельствуют о сложном физическом состоянии геологической среды, где произошли два сильных события — исследуемое в настоящей работе землетрясение и произошедшее ранее, на Тихоокеанской плите землетрясение “Углового поднятия”, очаг которого так же располагается в слое на глубинах 30–60 км. Афтершоки с пониженными значениями V_p/V_s последнего, наблюдаются до сих пор. Положение очаговых зон на границе сред с различным упруго динамическим состоянием, может быть, в какой-то степени объясняет пониженные значения V_p/V_s , свидетельствующие о процессе дилатансии — растяжения в этом слое.

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

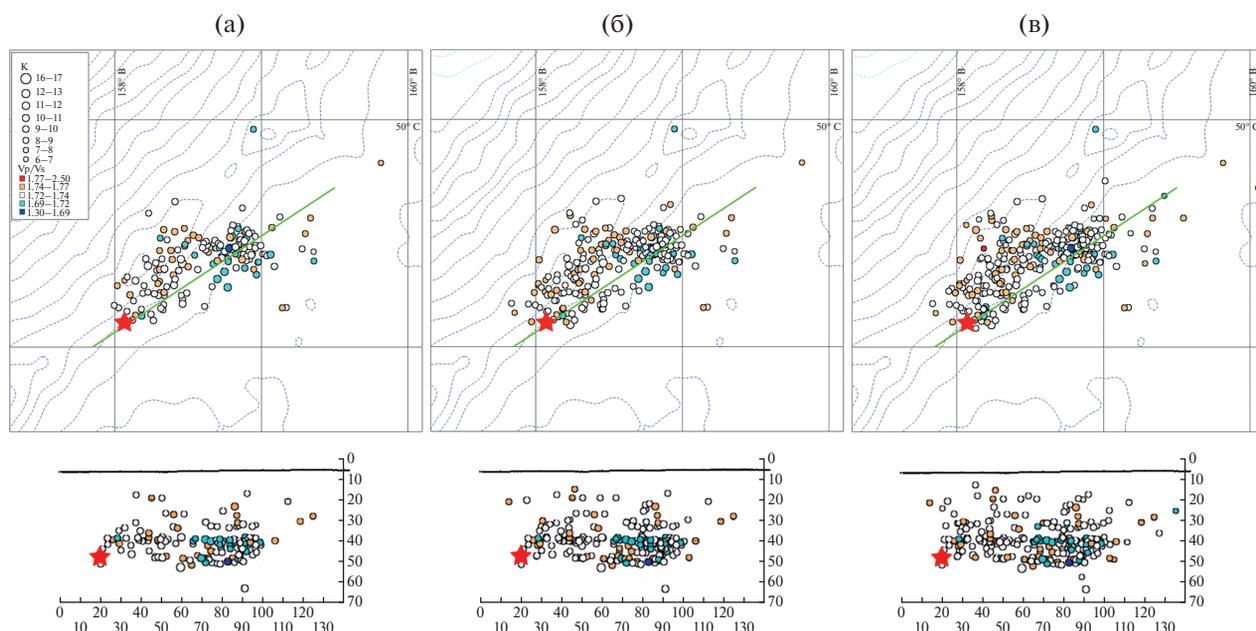


Рис. 8. Распределение афтершоков землетрясения 25.03.2020 по площади и глубине: а — первые часы, сутки; б — двое суток; в — три дня. Окраска эпицентров в соответствии с параметром V_p/V_s . Главный толчок показан звездочкой.

очага землетрясения дает 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 достигать 50–100 км [Гарагаш, Хайдаров, 1989].

Выше было отмечено, что это сложно построенная в тектоническом плане область сочленения Тихоокеанской плиты, Камчатки с Курильской островной дугой. При заглублинии событий характерно появление повышенных значений параметра V_p/V_s , что свидетельствует о сжатии, наблюдаемом при погружении холодного фокального слоя в мантию континентального склона Камчатки. В пользу того же предположения говорят также повышенные скорости V_p , полученные в работах по ГСЗ и землетрясениям [Федотов, Славина, 1968] (см. рис. 9).

Представление о формировании глубоких раздвигов в пределах краевого океанического вала и на внешнем склоне желоба сложились достаточно давно на основе теоретических моделей упруго-пластичного изгиба литосферной плиты и данных о механизмах землетрясений. Позднее было осознано значение этого процесса в глубоких метаморфических изменениях океанской литосферы. На основе петрологических моделей верхней мантии и экспериментальных данных по разрушению горных пород в условиях высоких давлений и температур, была предложена концепция глубинной гидратации океанской литосферы в пределах краевого вала и внешнего склона глубоководного желоба [Каракин и др., 1982;

Лобковский и др., 1986; Лобковский, 1988; Николаевский, 1996].

Наблюдаемые нами пониженные значения параметра V_p/V_s , свидетельствующие о процессе растяжения — дилатансии в районе возникновения землетрясения подтверждают предположение о наличии раздвигов и раскрытии пор в зонах трещиноватости, высказанные вышеперечисленными исследователями.

По данным Н.И. Селиверстова [1998] перед вхождением в зону субдукции литосферная плита изгибается. При этом, верхняя часть плиты испытывает растяжение. В результате, в самой верхней части литосферы образуются магистральные разрывы (раздвиги), которые на более значительных глубинах сменяются сначала зонами трещиноватости, а затем (до глубин 30–35 км) — зонами раскрытия пор. Вследствие этого, верхний слой литосферы становится водопроницаемым, и в нем активно протекают процессы регионального метаморфизма.

Среди фактических данных, подтверждающих реальность процесса глубинной гидратации океанской литосферы вблизи островных дуг, в частности — Курило-Камчатской, в первую очередь следует упомянуть “двойные” сейсмофокальные зоны. Структура этих зон находит убедительное объяснение в рамках обсуждаемой концепции [Каракин и др., 1982]. Признаки существования двойной сейсмофокальной зоны под Камчаткой показаны в работе [Славина и др., 2019]. Гидратация литосферной плиты при ее изгибе и погруже-

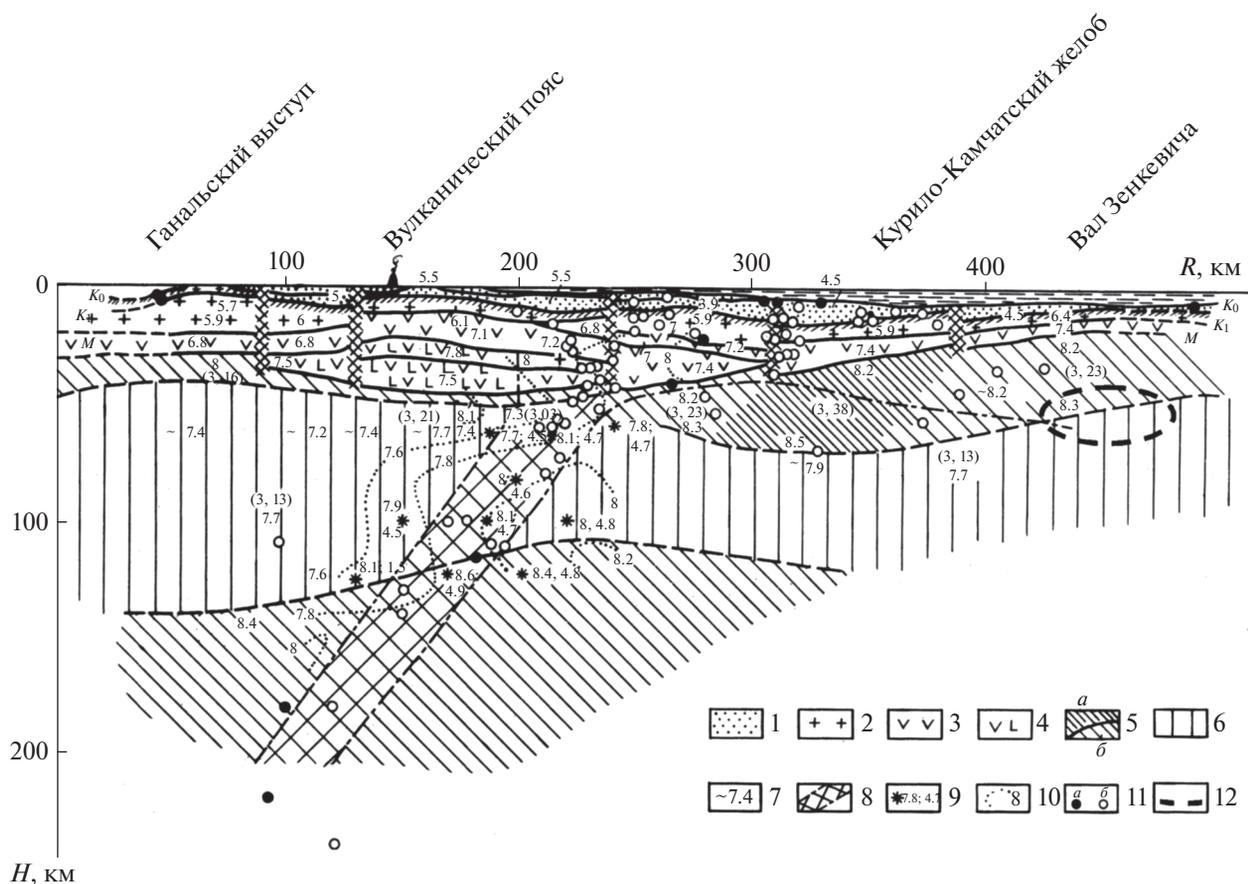


Рис. 9. Обобщенный разрез строения среды по профилю в зоне перехода от южной Камчатки к Тихому океану по геолого-геофизическим данным [Глубинное сейсмическое ..., 1978].

1 – осадочный слой; 2 – гранитный слой; 3 – базальтовый слой; 4 – переходный коромантийный слой; 5 – верхняя мантия (*a* – над астеносферным слоем, *b* – ниже астеносферного слоя); 6 – астеносферный слой; 7 – скорости [Федотов, Славина, 1968]; 8 – сейсмофокальная зона [Кузин, 1974]; 9 – скорости продольных и поперечных волн [Кузин, 1974]; 10 – изолинии скоростей [Аниконов и др., 1974]; 11 – гипоцентры землетрясений в плоскости разреза; 12 – очаговая область землетрясения 25.03.2020 (условно показана пунктирным овалом).

нии, может вызывать понижение скоростей V_p и V_s и их отношения, параметра V_p/V_s .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ распределения параметра V_p/V_s в Камчатской фокальной зоне, на Тихоокеанской плите, в очаговой области сильного события и в области сочленения Тихоокеанской и Охотоморской плит. Рассмотрен характер особенностей его распределения в очаговой области сильного землетрясения 25 марта 2020 г. произошедшего на Тихоокеанской плите, юго-восточнее п-ова Камчатка, к востоку от Северных Курильских островов. А также в периоды его подготовки и развития афтершокового процесса.

Землетрясение на Тихоокеанской плите с магнитудой такого уровня ($M_L = 7.6$, $M_W = 7.5$) является достаточно редким событием. Регулярность мониторинга параметра V_p/V_s для Камчатской

фокальной зоны позволило авторам оценить поведение параметра и выявить его особенности в области контакта Тихоокеанской плиты с континентальным склоном Камчатки, фокальным слоем – слоем субдукции, погружающимся под Камчатку. Оценить возможные области растяжения и сжатия геологической среды.

Результаты работ по методу ГСЗ и НСП, имевшие место в этом районе ранее, позволили уточнить особенности строения среды района возникновения землетрясения. Землетрясение произошло на границе мантийного слоя и астеносферного слоя пониженных скоростей и плотности.

Наблюдаемые пониженные значения параметра V_p/V_s , вероятно, связаны и объясняются сложными геодинамическими условиями на границе сред.

Обнаружено изменение характера поля параметра с пониженных значений на повышенные в

области контакта и сочленения плит — Тихоокеанской, Охотоморской и фокальных зон субдукции Камчатской и Курильской.

Приведенные результаты распределения параметра V_p/V_s на Тихоокеанской плите в очаговой области сильного события, в фокальной зоне в области сочленения Тихоокеанской и Охотоморской плит свидетельствуют об информативности параметра, позволяющего судить о состоянии геологической среды, напряженном состоянии плиты в области изгиба перед вхождением в зону субдукции. В области очага землетрясения, как в период его подготовки, так и в процессе разрядки и сброса напряжений в афтершоковый период.

Результаты анализа поля V_p/V_s приводят нас к выводу о том, что кинематический параметр V_p/V_s характеризует упругие и прочностные особенности геофизической среды. Отражает характер и изменения поля напряжений. Кроме того, с помощью картирования параметра по площади могут быть выявлены глубинные, подчас погребенные, сеймотектонические структуры. Области повышенного градиента поля, зоны смены знака аномалий, могут рассматриваться как погребенные тектонические структуры, в том числе и ступени, с резким перепадом высот в фундаменте и верхах мантии. А также как возможные готовящиеся очаговые зоны будущих сильных землетрясений.

Активные, оживающие участки разломов характеризуются появлением и накоплением аномалий отрицательного знака, или высоким градиентом при смене знака аномалии. Параметр может рассматриваться как маркер напряженного состояния среды, в том числе Тихоокеанской плиты в области ее изгиба перед вхождением в зону субдукции. Проведенные ранее исследования в вулканических структурах Камчатки показали, что параметр V_p/V_s информативен при исследовании состояния активности и магматического вещества вулканов [Славина и др., 2019].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акопян С.Ц. Выявление особенностей сильного землетрясения к востоку от Курильских островов 25 марта 2020 г. на основе метода сейсмической энтропии // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 2. С. 5–18.
- Аниконов Ю.Е., Пивоварова Н.Б., Славина Л.Б. Трехмерное поле скоростей фокальной зоны Камчатки // Математические проблемы геофизики. Глава 1. Вып. 5. Новосибирск, 1974.
- Балеста С.Т. Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 135 с.
- 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.
- Геология СССР. Т. 31. Камчатка, Курильские и Командорские острова. Геологическое описание. М.: Недра, 1964. 733 с.
- Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки / Ред. А.А. Попов, Г.С. Гнебиденко. М.: Наука, 1978. 130 с.
- Гнебиденко Г.С., Быкова В.Г., Веселов О.В., Воробьев В.М., Ким Чун Ун, Тараканов Р.З. Тектоника Северо-Западной части Тихого океана. М.: Наука, 1983. 120 с.
- Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.
- Каракин А.В., Лобковский Л.И., Николаевский В.Н. Образование серпентинитового слоя океанической коры и некоторые геолого-геофизические явления // Докл. АН СССР. 1982. Т. 265. № 3. С. 572–576.
- Кузин И.П. Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. М.: Наука, 1974.
- Кучай М.С., Славина Л.Б., Чебров Д.В. Отражение динамики развития афтершокового процесса землетрясения 20.12.2018, $M_w = 7.3$ в поле кинематического параметра V_p/V_s // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 2. Вып. 46. С. 30–40.
- Лобковский Л.И. Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 252 с.
- Лобковский Л.И., Николаевский В.Н., Каракин А.В. Геолого-геофизические следствия серпентинизации океанической литосферы // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1986. Т. 61. Вып. 4. С. 3–12.
- Лутиков А.И., Донцова Г.Ю., Лиходеев Д.В., Рогожин Е.А. Сильное землетрясение 25 марта 2020 г. к востоку от Северных Курил // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56. № 4. С. 68–82.
<https://doi.org/10.21455/si2020.4-5>
- Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.
- 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., 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, Курильской депрессии, Закавказья и западного Прикаспия // Вопросы инженерной сейсмологии. 2017. Т. 44. № 1. С. 31–56.
- Славина Л.Б., Кучай М.С. К оценке поля напряжений командорского блока Алеутской островной дуги по данным кинематического параметра V_p/V_s и механиз-

мам очагов землетрясений // Геофизические исследования. 2019. Т. 20. № 4. С. 65–93.

Славина Л.Б., Кучай М.С., Лиходеев Д.В., Сеньков С.Л. Связь параметра V_p/V_s с состоянием магматического вещества и активностью северной группы вулканов Камчатки // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18. № 2. С. 28–50.

Славина Л.Б., Мячкин В.В. Кинематические предвестники сильных сейсмических событий (методика и результаты прогноза землетрясений на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2005. № 3. С. 24–37.

Федотов С.А., Славина Л.Б. Оценка скоростей продольных волн в верхней мантии под северо-западной

частью Тихого океана и Камчаткой // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1968. № 2. С. 8–32.

Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В., Абубакиров И.Р., Дроздина С.Я., Митюшкина С.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К., Титков Н.Н. Землетрясение Углового поднятия 20 декабря 2018 г. $M_W = 7.3$ в зоне сочленения камчатского и алеутского океанических желобов // Вестник Камчатской региональной организации (учебно-научный центр). 2020. № 1(45). С. 100–117.

Global Centroid Moment Tensor (CMT) Catalog. <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.

National Earthquake Information Center (NEIC) (<https://earthquake.usgs.gov/contactus/golden/neic.php>)

Kinematic Parameter V_p/V_s of the Southern Segment of the Kamchatka Seismofocal Zone During the Preparation of the Earthquake of March 25, 2020, $M_W = 7.5$ and the Development of its Aftershock Process

M. S. Kuchai^{1, *} and L. B. Slavina^{1, **}

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia

*e-mail: kuchay@ifz.ru

**e-mail: slavina@ifz.ru

Monitoring of the kinematics parameter V_p/V_s for the Kamchatka focal zone has been carried out for a long time and has a regular character. This made it possible to evaluate the behavior of the parameter and identify its features during the preparation and development of the focal process of the earthquake on March 25, 2020, which occurred on the Pacific plate, in the area of contact of the Pacific plate with the continental slope of Kamchatka. An earthquake of March 25, 2020 with a magnitude of this level ($M_L = 7.6$, $M_W = 7.5$) is a fairly rare event on the Pacific Plate. To clarify the features of the structure of the environment in the area of the occurrence of an earthquake, the results of work by the DSS and NSP method, which took place in this area earlier, were used. As a result of the research, it was shown that the earthquake source is located in the bend of the sinking Pacific plate. The focal area is confined to the layer at the border of the crust and mantle with the asthenosphere. The layer is located at a depth of 30–60 km, with reduced values of the wave velocity V_p and V_s . The area of plate bending along Kamchatka is characterized by lower V_p/V_s values, which indicates the process of tension along the plate. The focus originated at the junction of the plunging Pacific plate under the southern end of Kamchatka and the Northern Kuril Islands, as well as the Okhotsk Sea plate. In this area, there is a sharp change in the anomalous values of the parameter. From lower values – to higher ones, characteristic of the compression process. The studies made it possible to assess the probable areas of extension and compression of the geological environment.

Keywords: seismic wave velocities, V_p/V_s parameter, subduction zone, earthquake source, Pacific plate