

ФАКТОРЫ ЗАТУХАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ЗЕМНОЙ КОРЕ ПРИАМУРЬЯ И СОПРЕДЕЛЬНОЙ ТЕРРИТОРИИ**Т.В. Меркулова, В.В. Пупатенко***Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, Россия;*
e-mail: merkulova@itig.as.khb.ru, pvv2.dv@yandex.ru

Поступила в редакцию 2 октября 2025 г.

В работе для Приамурья и прилегающих территорий исследована корреляция сейсмической добротности земной коры с возрастом тектонической активизации, скоростным строением глубинных слоев, выделенной сейсмической энергией коровых землетрясений, положением кровли астеносферы, тепловым потоком, расчетными температурами на глубинах 50 и 100 км. Выявлено, что по всей территории в целом наблюдается высокий уровень корреляции добротности с частью указанных параметров: с возрастом тектонической активизации, со скоростью поперечных волн и с температурой, и умеренный уровень корреляции с выделенной сейсмической энергией. Отмечается слабая корреляция сейсмической добротности с положением глубины подошвы литосферы (кровли астеносферы) и тепловым потоком на поверхности. Результаты более подробного картирования пространственных вариаций коэффициентов корреляции добротности и указанных параметров показывают, что наиболее вероятной причиной наблюдаемых вариаций является совместное влияние неоднородности температуры и содержания флюидов в верхней мантии и земной коре, которая, в свою очередь, может быть вызвана влиянием Тихоокеанской зоны субдукции.

Ключевые слова: сейсмические волны, затухание, добротность, литосфера, тепловой поток, корреляция геофизических параметров, Приамурье, Приморье.

ВВЕДЕНИЕ

Затуханием сейсмических волн называют уменьшение амплитуды волны при прохождении ее в геологической среде вследствие рассеяния на неоднородностях, потерь энергии на нагрев среды и других факторов [6, 7]. Основной характеристикой затухания сейсмических волн выступает безразмерная величина, называемая сейсмической добротностью (Q) или просто добротностью, которая показывает потерю волновой энергии за один цикл колебаний. Чем выше значения этого параметра, тем ниже потери волновой энергии, а амплитуды сейсмических волн при прохождении через среду будут оставаться более высокими.

Сейсмическая добротность является важной геофизической характеристикой и содержит информацию о тектонической активности, особенностях структуры, степени раздробленности и реологических свойствах земной коры и мантии. К настоящему времени установлена корреляция добротности с возрастом земной коры, степенью ее неотектонической активизации, к признакам которой относится текто-

ническая раздробленность, тепловой поток, сейсмичность. Отмечаются отличия по величине добротности горных районов (более высокие значения Q) от впадин [41]. В общем случае, информация о сейсмической добротности необходима для разработки современных геодинамических моделей, познания механизмов взаимодействия глубинных и поверхностных процессов, что особо важно для понимания природы сейсмического процесса и оценки сейсмической опасности в регионе.

К настоящему времени оценки сейсмической добротности различными методами получены как для больших по площади регионов, так и для отдельных сейсмоактивных зон [1, 5, 21, 25, 28–30]. Выявленные значительные вариации добротности по латерали позволяют ранжировать регионы по уровню их тектонической активности. Низкие значения добротности ($Q < 200$) характерны для тектонически-активных регионов, высокие ($Q > 600$) – для стабильных платформенных областей с низким уровнем тектонической активности. Промежуточный диапазон значений ($Q = 200–600$) обычно отмечается в районах с умеренной

тектонической активностью [34]. Также установлено уменьшение добротности с глубиной из-за вертикальной неоднородности среды [7].

Существует несколько методов определения сейсмической добротности по записям сейсмических колебаний. Для оценки пространственных вариаций добротности в континентальной коре обширных территорий наилучшим образом подходит метод, использующий записи коды поверхностных L_g -волн от землетрясения на одной станции. В отличие от методов, использующих другие типы волн, получаемые значения характеризуют только затухание сейсмических волн в пределах земной коры. С использованием такого подхода ранее были получены карты распределения значений сейсмической добротности крупных областей и целых континентов [25, 35–37] и более детальные карты для отдельных регионов, в том числе Приамурья [18].

При этом для региона Приамурья и его сопредельной территории не было изучено соотношение сейсмической добротности с тектонической и сейсмической активностью. Исследование возможной взаимосвязи добротности с геофизическими параметрами представляет большой интерес для познания общих законов формирования зоны перехода между крупнейшими структурами – Евразийским континентом и Тихим океаном (рис. 1). Такие данные необходимы и для задач оценки сейсмической опасности в регионе, так как сейсмичность региона исследована недостаточно, а инструментальные наблюдения начались только в 1975 г.

В нашей работе сделана попытка интерпретировать наблюдаемые особенности распределения сейсмической добротности в регионе (рис. 2, а). Для этого рассмотрена корреляция добротности с рядом геолого-геофизических параметров, таких как возраст консолидации земной коры, скоростное строение глубинных слоев, сейсмическая энергия, положение кровли астеносферы, тепловой поток, расчетные температуры на глубинах 50 и 100 км.

МЕТОДИКА И ДАННЫЕ

В работе использованы два основных источника геофизических данных. Во-первых, это результаты определения сейсмической добротности по коду поверхностных L_g -волн на частоте 1 Гц, взятые из [18].

Эти значения получены методом накопительных спектральных отношений (stacked spectral ratio method) [35, 40] по записям 36 землетрясений, которые произошли в Приамурье и на прилегающих территориях с 2007 по 2017 г. и имели магнитуду от 3.6 до 5.2. Результаты каждого из этих определений отражают усредненные значения добротности для всей континентальной коры в пределах области, проекция которой близка к эллипсоиду с преимущественным размером от 300 до 800 км, а все вместе они позволили получить значения поля добротности континентальной коры с разрешением порядка 400–500 км (рис. 2, а). Меньшие неоднородности добротности сглаживаются и становятся преимущественно неразличимыми.

Второй источник данных представляет собой разнородные данные о значениях различных геофизических полей на той же территории. В качестве таковых использовались:

- информация о глубине подошвы литосферы, т.е. кровли астеносферы, полученная из [22];
- данные о тепловом потоке, взятые из сводки, приведенной в работе [4];
- данные о распределении скоростей поперечных сейсмических волн на глубинах 100 и 150 км для Восточной Азии из работы [2];
- значения расчетных температур на глубинах 50 и 100 км, опубликованные в работе [24];
- суммарная выделившаяся энергия коровых землетрясений (с глубиной очага до 50 км). Для ее расчета использовался каталог ИТиГ ДВО РАН, обобщающий данные о землетрясениях, опубликованные в сборниках «Землетрясения в СССР», «Землетрясения России», «Землетрясения Северной Евразии» [10–12]. Сейсмическая энергия рассчитывалась на единицу площади ($1^\circ \times 1^\circ$) для событий с магнитудой ≥ 1 , произошедших с 1960 г.

В работе для определения наличия и меры статистической связи между значениями величин использован метод пространственного корреляционного анализа. Линейный (нормализованный) коэффициент корреляции рассчитывался по формуле:

$$k = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}},$$

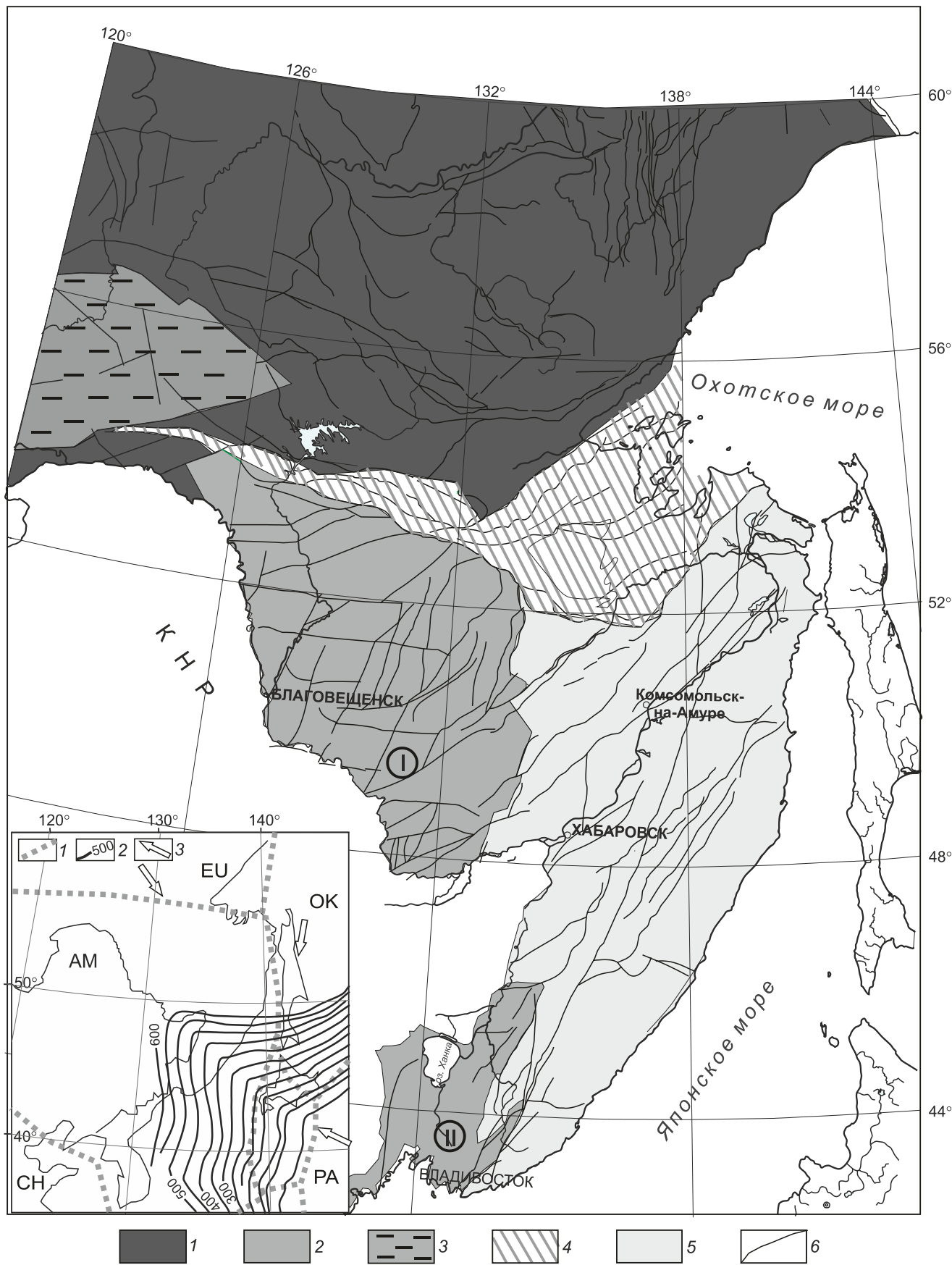
где X , Y – первая и вторая величины; \bar{X} , \bar{Y} – их средние значения.

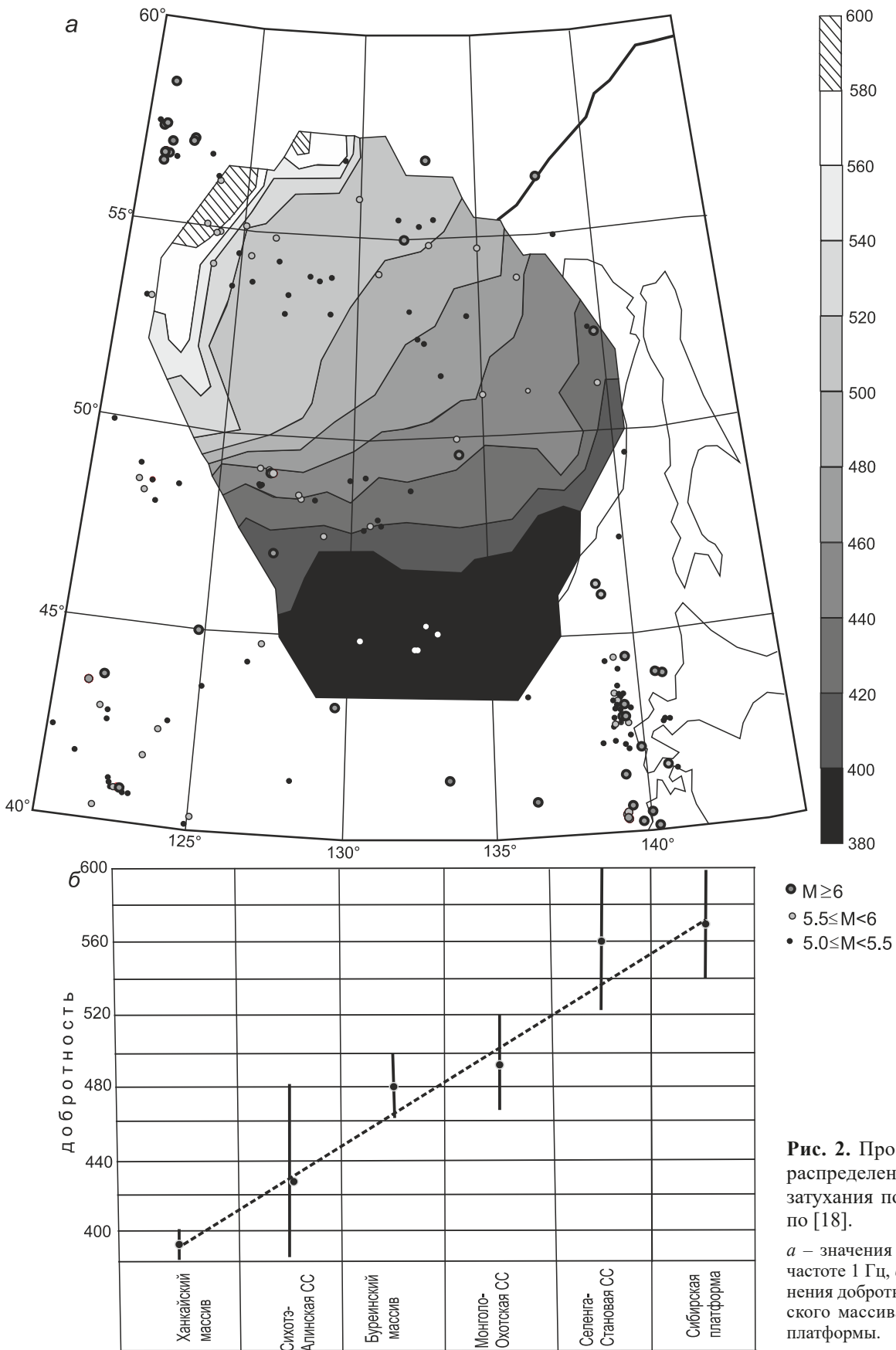
Рис. 1. Геолого-структурная схема района исследований, по [22], с упрощениями.

1 – Сибирская платформа; 2 – срединные массивы: I – Буреинский, II – Ханкайский; складчатые системы: 3 – Селенга-Становая; 4 – Монголо-Охотская; 5 – Сихотэ-Алинская; 6 – региональные разломы, по [9].

На врезке: 1 – границы плит; 2 – изолинии глубины Тихоокеанской зоны субдукции в км, по [32]; 3 – вектор движения плит.

Плиты: AM – Амурская, EU – Евразийская, OK – Охотская, CH – Китайская, PA – Тихоокеанская.





В качестве величины X использованы значения добротности по коде поверхностных L_g -волн. В качестве величины Y использованы значения упомянутых ранее геофизических полей: глубина подошвы литосферы, данные о тепловом потоке, скорости поперечных волн на глубинах 100 и 150 км, температура на глубинах 50 и 100 км, суммарная выделившаяся энергия коровых землетрясений.

Для каждого поля рассчитывалось полное значение нормализованного коэффициента корреляции для всей исследуемой территории, а также отдельные его значения для небольших площадей размером $5^\circ \times 5^\circ$, по которым затем строились карты пространственного распределения статистической связи между значениями величин.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования представляет собой переходную зону от Евразийского континента к Тихому океану, которая преимущественно включает в себя внутриконтинентальные районы Амурской плиты, различающиеся по времени формирования и строению. Небольшая северная часть района охватывает окраину Евразийской плиты. Амурская плита находится под геодинамическим воздействием как Евразийской плиты, так и Тихоокеанской плиты с северо-западной траекторией движения. Клинообразный выступ Тихоокеанской зоны субдукции погружается под континент до глубины 600 км в южной части района исследования (рис. 1), в связи с чем эта часть восточной Азии рассматривается как единая область подъема глубинных флюидов над стагнирующим слэбом [19, 32, 33]. Зона перехода характеризуется интенсивным орогенезом, проявлениями рифтогенеза, современным вулканизмом, сейсмичностью, неоднородностью геотермического режима и величины теплового потока [3, 4].

На более мелком структурном уровне и с учетом разной истории геологического развития регион исследования представлен серией разновозрастных тектонических структур, включающих древний Сибирский кратон, массивы с докембрийским фундаментом (Буреинский, Ханкайский); разновозрастные складчатые системы: Селенга-Становую, Монголо-Охотскую, Сихотэ-Алинскую (рис. 1).

Сибирская платформа представлена архейскими метаморфическими комплексами, перекрытыми чехлом рифейско-фанерозойских осадочных отложений. Буреинский массив выполнен породами архейского, палеозойского и мезозойского возраста. Комплексы мезозойского возраста объединены в Хингано-Охотский вулканоплутонический пояс, образующий об-

ширную область СВ простирания, которая интерпретируется как ареальная область магматизма, возникшая в обстановке трансформной окраины, что в результате вызвало формирование гранитоидов и вулканоплутонических комплексов. В Ханкайском массиве кроме древних толщ докембрийского и палеозойского возраста широко представлены мезозойские и кайнозойские магматические образования: раннемеловые граниты, а также позднемеловые и палеоген-четвертичные вулканоплутонические ассоциации [3].

Селенга-Становая складчатая система сформировалась в раннепалеозойское время. Монголо-Охотская складчатая система выполнена средне-мезозойскими (юрско-раннемеловыми) комплексами. В строении Сихотэ-Алинской складчатой системы отмечается преобладание поздне-мезозойских осадочных и магматических образований. Еще более мелкие тектонические элементы, не показанные на рис. 1, представлены разновозрастными терригенными впадинами и вулканическими поясами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Корреляция добротности с возрастом консолидации земной коры региона

Изучение параметров затухания во многих регионах показало, что сейсмическая добротность, как правило, зависит от уровня тектонической активности структур. Активные структуры характеризуются пониженной добротностью, а древние стабильные области соответствуют зонам повышенной добротности [8, 31, 34]. Сопоставление диапазонов добротности крупных тектонических структур региона показало, что этот параметр увеличивается от Сихотэ-Алинской складчатой системы по мере движения к Сибирской платформе (рис. 2, б). При этом в строении Буреинского и Ханкайского массивов участвуют древние толщ архейского и палеозойского возраста, но значения добротности относительно низкие. Этот факт, вероятно, объясняется значительной активизацией этих структур в мезозойское время. Аномально низкая величина добротности Ханкайского массива может быть обусловлена формированием магматических очагов палеоген-четвертичного возраста [3]. Таким образом, отмечается латеральная зависимость добротности от времени консолидации земной коры.

Корреляция добротности и скорости поперечных волн на глубинах 100 и 150 км

Распределение скорости сейсмических волн несет информацию о реологическом состоянии литосферы и верхней мантии [15–17, 20]. Общеизвестно, что значительную часть латеральных аномалий сейсмической скорости можно объяснить вариациями

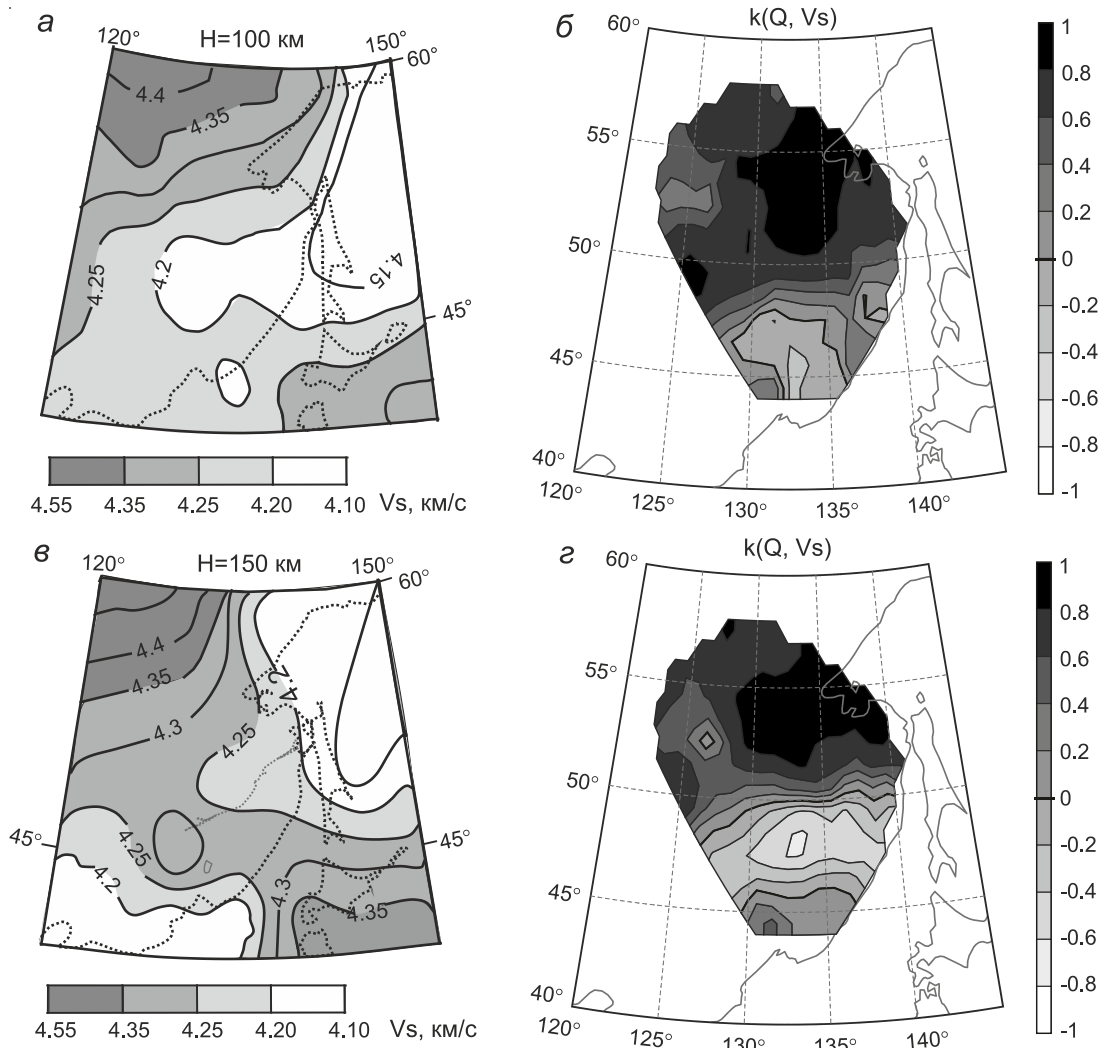


Рис. 3. Распределение скорости S-волн, по [2], на глубине 100 км (а), на глубине 150 км (в); распределение коэффициента корреляции добротности и скорости S-волн на глубине 100 км (б), на глубине 150 км (г).

температуры. В глобальном масштабе установлена обратная корреляция аномалий скорости поперечных волн V_s и температуры литосферы T : на кратонах наблюдаются высокие значения V_s и низкие T , в то время как в регионах с активной тектоникой, наоборот, характерны пониженные значения V_s и повышенные значения T . Однако современные исследования демонстрируют, что помимо температурного фактора доминирующую роль в контроле аномалий V_s и Q могут играть и другие физические параметры. Такие факторы, как вариации состава мантии, флюиды, наличие зон частичного плавления по отдельности и вместе, оказывают не менее важное влияние на изменение V_s и Q [25].

В таблице приведены результаты корреляционного анализа распределения скорости поперечной волны на глубинах 100 и 150 км с величиной сейсмической

добротности Q (табл.). В обоих случаях отмечается высокий уровень корреляции. Нормализованный коэффициент корреляции параметров Q и V_s на глубине 100 км выше и составляет 0.867, в то время как на глубине 150 км – 0.714. Распределение значений коэффициента корреляции по площади показывает, что этот параметр изменяется от отрицательных значений на юге до максимальных величин к северу или северо-востоку (0.8–1.0) (рис. 3).

Корреляция добротности с глубиной до кровли астеносферы и с тепловым потоком

Астеносфера – слой повышенной вязкости, повышенной электрической проводимости и пониженных сейсмических скоростей и добротности, расположенный под более холодной и твердой литосферой [17]. Большинство исследователей признают, что в ее

Таблица.

Параметр № 1	Нормализованный коэффициент корреляции параметра № 1 с параметром	
	Добротность на частоте 1 Гц	Частотный параметр
Глубина кровли астеносферы	0.094	0.040
Vs 100 км	0.867	-0.805
Vs 150 км	0.714	-0.533
Логарифм суммарной выделенной энергии коровых землетрясений	0.434	-0.450
Температура на глубине 50 км	-0.878	0.775
Температура на глубине 100 км	-0.792	0.594

формировании большую роль играет температурный фактор, отмечают ее гетерогенность и разную высоту верхней границы (кровли). В связи с чем положение кровли астеносферы свидетельствует о степени активности тектоно-магматических процессов в литосфере и о величине теплового потока на земной поверхности. Такая точка зрения допускает не только совместное движение астеносферы и литосферы, но и геодинамическое воздействие первой на вторую. Пониженная вязкость астеносферного вещества определяет его текучесть (способность пластически деформироваться), что является важнейшим необходимым условием для проявления тектонических движений и сейсмичности.

Для района исследования наблюдается приуроченность аномально повышенных значений теплового потока (70–100 мВт/м²) к поднятиям кровли астеносферы до 60–80 км (рис. 4, а). Общее значение коэффициента корреляции сейсмической добротности и глубины до кровли астеносферы невелико и составляет 0.094. При этом наблюдаются три аномальных области, где коэффициент корреляции достигает значительных величин, таким образом некоторые зоны поднятия кровли астеносферы совпадают с зонами повышенных значений Q , но в среднем по району исследования этот эффект незначителен (рис. 4, б).

Общий коэффициент корреляции добротности с температурой на глубине 50 и 100 км составляет -0.878 и -0.792, то есть достигает очень высоких по модулю значений, но корреляция наблюдается обратная. На рис. 5 видно, что выделяются обширная об-

ласть, где коэффициент корреляции по модулю достигает практически единицы, и отдельные небольшие участки, где корреляция незначительна.

Корреляция добротности и коровой сейсмичности

Взаимодействие Амурской плиты с Тихоокеанской и Евразийской плитами инициирует сейсмическую активность на границах Амурской плиты и в ее пределах в виде внутриконтинентальных землетрясений. Коровые землетрясения региона обычно относятся к событиям слабой и умеренной интенсивности. За весь период наблюдений, начиная с конца девятнадцатого века, в регионе было зафиксировано лишь несколько десятков толчков с магнитудой $M \geq 5.0$. Землетрясения с $M = 6$ и 6.5 единичны. Достаточно сильные землетрясения с $M = 6.5$ образуют зону скопления только в крайней северо-западной части района исследования. Эпицентральное поле всех зарегистрированных сейсмических событий носит выраженный рассеянный характер.

Для проведения корреляционного анализа были выполнены расчеты сейсмической энергии коровых сейсмических событий с глубиной очага менее 50 км. Коэффициент корреляции добротности с логарифмом сейсмической энергии коровых землетрясений характеризуется умеренной величиной 0.434. Внутри района исследования значения коэффициента корреляции неоднородны, выделяется одна обширная и две локальные зоны с высокими значениями, а также зоны с обратной корреляцией (рис. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ

Переходя к дальнейшему обсуждению полученных результатов, необходимо предварительно сделать важное замечание. Выявленные корреляции между сейсмической добротностью и геофизическими параметрами не означают наличие причинно-следственных связей между этими величинами. Напротив, корреляция, там, где она обнаружена, демонстрирует наличие одной или нескольких основных первопричин, приводящих к появлению повышенных и пониженных значений величин. Такими первопричинами являются реологические и термальные параметры всей системы литосфера-астеносфера [25, 27]. Именно поэтому корректным является рассмотрение на первый взгляд парадоксальной корреляции между сейсмической добротностью земной коры и, например, скоростью поперечных волн в мантии [25, 27].

Значения сейсмической добротности в районе исследования равномерно увеличивается с юга на север: от величин 350–400 на юге Приморья до порядка 500 в районе Сибирской платформы. Детальные

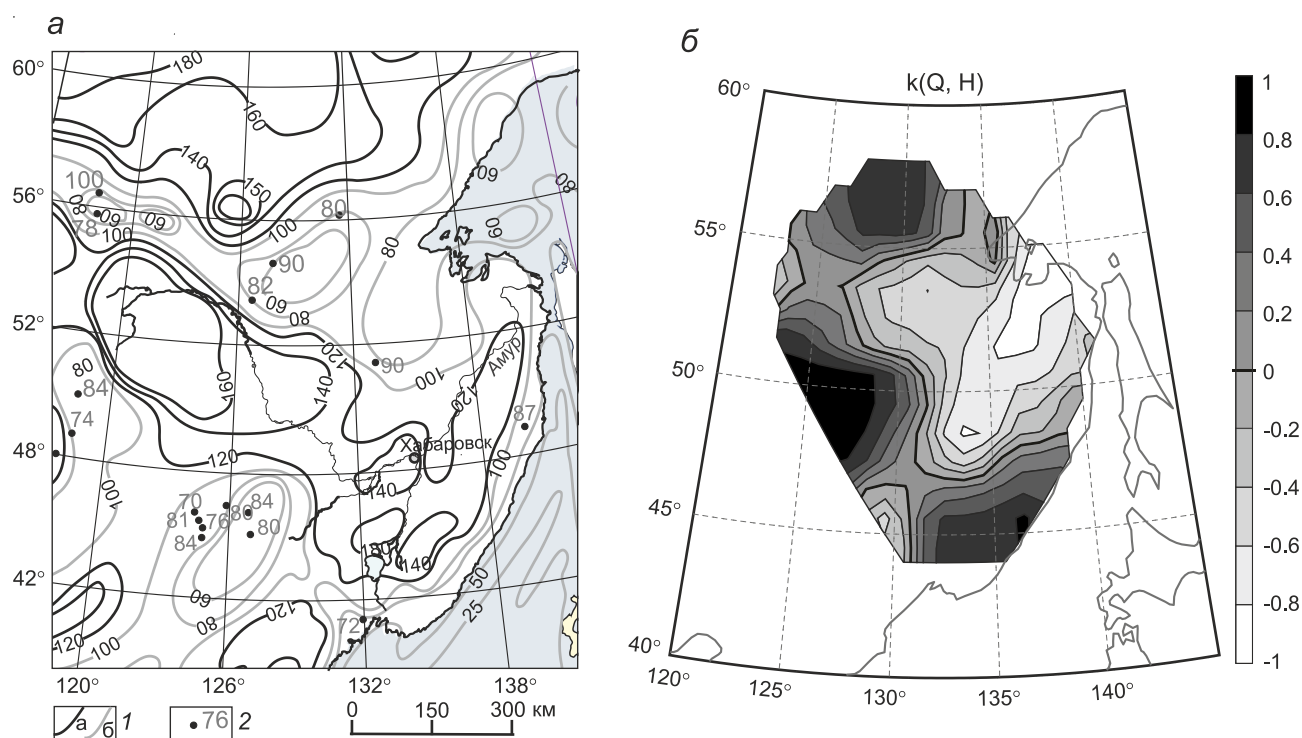


Рис. 4. Мощность литосферы (а) и распределение коэффициента корреляции мощности литосферы с добротностью (б). 1 – изолинии мощности литосферы в км, по [22]: повышенной мощности (а), пониженной мощности (б); 2 – значения теплового потока ≥ 70 мВт/м².

исследования северо-восточного Китая, захватывающие частично и наш район работ, показывают похожий диапазон Q – 300–600 на частоте 1 Гц [38, 41]. Такие величины сейсмической добротности соответствует промежуточному диапазону ($Q = 200$ –600), характерному для районов с умеренной тектонической активностью [34]. В регионе минимальные значения добротности выявляются на юге Приморья, где на поверхности развиты комплексы Ханкайского массива и мезозойские отложения Сихотэ-Алинской складчатой системы, а на глубинах порядка 600 км расположен клинообразный выступ Тихоокеанской зоны субдукции (рис. 1, 2). Далее добротность увеличивается до 480–500 в районе Буреинского массива, древние толщи которого, как и Ханкайского массива, были подвержены интенсивной тектонической активности в мезозойское время [3]. Такой же диапазон значений характерен и для северной части Сихотэ-Алинской складчатой системы. Далее, к северу добротность изменяется по мере увеличения возраста консолидации коры, достигая максимальной величины 560 в области сочленения раннепалеозойского Селенга-Станового орогена с Сибирской платформой. Подобные высокие значения Q , как правило, характерны для кратонов, щитов и платформ [34]. Таким образом, отмечается

корреляция величины сейсмической добротности с возрастом консолидации земной коры (рис. 2, б). Вероятнее всего, величина добротности прямо пропорциональна времени, прошедшему с момента последнего этапа тектонической активности.

Для района исследования характерна высокая корреляция сейсмической добротности, полученной по анализу коровых сейсмических событий, со скоростью поперечных волн на глубинах 100 и 150 км. Минимальные величины скорости соответствуют минимальным в регионе величинам добротности на юге (рис. 3). К северу и северо-западу происходит увеличение и скорости поперечных волн, и добротности. При этом достаточно близкий к единице (0.867) коэффициент корреляции получен для глубины 100 км, но и для глубины 150 км значения коэффициента корреляции остаются высокими – 0.714. Необходимо ещё раз отметить, что столь высокие значения коэффициента корреляции получены, несмотря на то что в работе использованы значения добротности, характеризующие только затухание сейсмических волн в земной коре. Это прямо указывает на значительное участие мантийных процессов в реологических особенностях и физическом состоянии пород земной коры [25, 27].

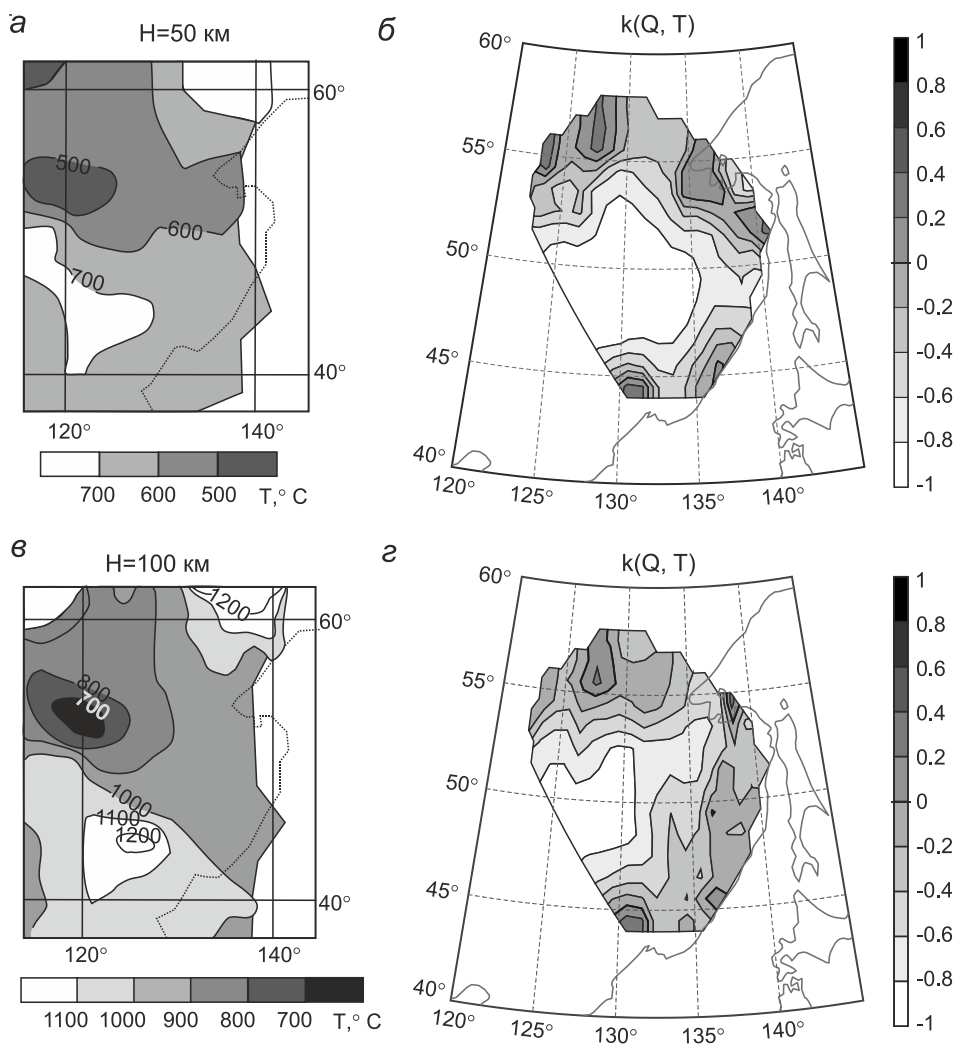


Рис. 5. Температура на глубине 50 км (а), на глубине 100 км (в); коэффициент корреляции добротности и температуры на глубине 50 км (б), на глубине 100 км (г).

По современным данным на основе лабораторных исследований свойств пород, вариации аномалий сейсмической скорости и затухания в мантии обычно интерпретируются как изменения температуры. Наблюдается обратная корреляция скорости и добротности с температурой, т.е. в стабильных районах, где наблюдаются высокие V_s и Q , преобладают низкие температуры, в то время как для наиболее активных регионов характерны низкие величины сейсмической скорости и добротности, но интенсивные положительные температурные аномалии [35, 36]. Т.е. более низким значениям добротности должны соответствовать более высокие значения теплового потока в регионе.

Для района исследования наблюдается высокая корреляция скорости и добротности, оба этих параметра преимущественно увеличиваются в направлении с ЮВ на СЗ, следовательно, следует ожидать понижение температуры в этом же направлении. Полученная

в работе обратная корреляция добротности и температуры это подтверждает (табл.).

По данным глобальных карт, в которых распределения температуры в верхней мантии были рассчитаны на основе мощности литосферы по данным сейсмической томографии, Р-Т условий ксенолитов и теплового потока, на глубине 50 км происходит уменьшение температуры от побережья к Сибирской платформе от 700° до 500°C (рис. 5). На глубине 100 км температура также существенно понижается, с 1100° до $700\text{--}800^\circ \text{C}$ [25]. Нормализованный коэффициент корреляции добротности и температуры для всей территории достигает очень высоких (по модулю) значений -0.878 и -0.792 , соответственно (табл.).

При этом не наблюдается существенной корреляции добротности с мощностью литосферы, т.е. кровлей астеносферы и поверхностным тепловым потоком (рис. 4). Причина этого, вероятно, в том, что

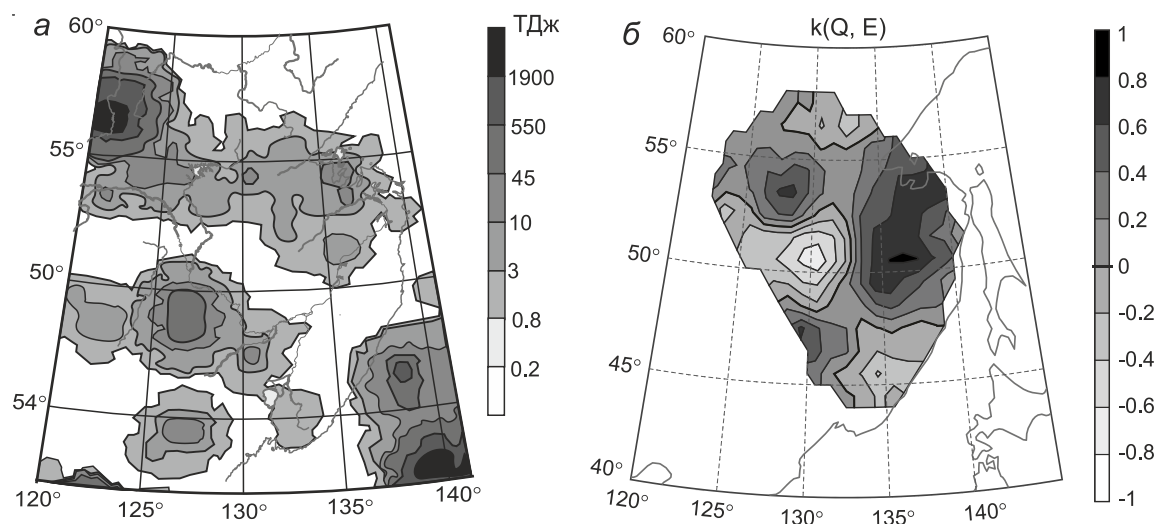


Рис. 6. Сейсмическая энергия коровых землетрясений (а) и распределение коэффициента корреляции сейсмической энергии коровых землетрясений и добротности (б).

сейсмические модели V_s и Q дают моментальную картину физического состояния коры и верхней мантии, а поверхностный тепловой поток отражает ее термический режим в прошлом. Как видно на рис. 4, а, повышенные значения теплового потока (> 70 мВт/м²) приурочены к подъему кровли астеносферы, где мощность литосферного слоя достигает только 60–80 км. Значимого уменьшения теплового потока вблизи Сибирской платформы не наблюдается, напротив, здесь выявленное единственное в регионе самое высокое значение теплового потока 100 мВт/м². Вероятно, слабая разница температур от океана к Сибирской платформе на глубине не обеспечивает хорошо выраженные вариации теплового потока на дневной поверхности. В некоторых регионах получен подобный вывод, что вариации Q земной коры только косвенно связаны с изменениями температуры [35, 36]. Т.е. наблюдается слабая корреляция добротности с тепловым потоком вблизи дневной поверхности, но отмечается сильная обратная корреляция с рассчитанной температурой на глубинах 50 и 100 км.

На рис. 3, 5 видно, что выделяются участки, где общеизвестная и теоретически ожидаемая прямая корреляция сейсмической добротности со скоростью и обратная корреляция добротности с температурой нарушается. При этом коэффициент корреляции либо несущественно отличается от нуля, либо имеет знак, противоположный теоретически ожидаемому: отрицательный для V_s и положительный для температуры. Первый такой участок находится в южной части района исследования, где на глубине отмечается клинообразный выступ Тихоокеанской зоны субдукции,

второй – в северной части. Слабая корреляция добротности с указанными выше параметрами может свидетельствовать о явно нетермическом происхождении вариаций аномалий скорости и добротности. В регионах с активной тектоникой одни лишь температурные эффекты не могут в достаточной степени объяснить аномалии скорости и, соответственно, добротности в литосфере. Одним из факторов, который может влиять на V_s и Q , является наличие флюидов (летучих газов или жидкостей). Флюидами в веществе мантии можно объяснить особенности строения верхней мантии. Существование в ней слоев пониженных сейсмических скоростей и даже изменение состава мантийного вещества могут быть связаны с геохимическими особенностями глубинных флюидов [13, 14, 17]. Значимое влияние на состав и содержание флюидов глубинных и близповерхностных горизонтов могут иметь процессы, связанные с зонами субдукции [26, 39]. В зонах субдукции в результате дегидратации материала погружающейся океанической коры верхние части мантии относительно быстро насыщаются флюидами [23, 39].

В нашем случае наблюдается хорошая корреляция с возрастом консолидированной коры, скоростью S-волн, температурой на глубине, но слабая корреляция добротности с тепловым потоком вблизи дневной поверхности. Это позволяет предположить, что латеральные вариации добротности лучше всего объясняются совместным влиянием двух факторов: температуры и содержанием флюида в разломах и системах взаимосвязанных трещин в земной коре. В районах, которые были стабильны в течение длительного вре-

мени, происходит потеря флюидов или поглощение их ретроградным метаморфизмом [35]. В нашем случае наиболее стабильные районы Селенга-Становой складчатой системы и Сибирской платформы с относительно древним временем консолидации коры характеризуются повышенной добротностью и, вероятно, незначительным содержанием флюидов, что может способствовать таким важным для сейсмичности факторам, как упрочнение пород в зонах разломов или повышение жесткости [13].

Представленные карты распределения коэффициентов корреляции по району исследования показывают, что только карты корреляции добротности со скоростью демонстрируют практически плавное изменение в направлении от южного Приморья к Сибирской платформе аналогично изменению добротности. Корреляция с другими параметрами, в том числе с температурой, носит более сложный характер с наличием аномальных зон повышенных и пониженных значений. Этот факт свидетельствует, что только действием температурного фактора объяснить вариации добротности невозможно. В некоторых работах сделано предположение, что низкая добротность земной коры может быть вызвана водой, выделяющейся в результате гидротермальных реакций при этих повышенных температурах, или что высокие температуры на глубине могут управлять циркуляцией флюидов вблизи поверхности [35, 39].

В работе мы изучили корреляцию добротности с распределением сейсмической энергии, выделенной только при коровых сейсмических событиях с глубиной меньше 50 км. Общий уровень корреляции этих параметров для всего района исследования – умеренный, коэффициент корреляции составляет 0.434. Это указывает на то, что физические условия среды, которые определяют величину и вариации добротности по региону, несомненно, влияют на сейсмическую активность, но не являются определяющими факторами формирования зон сильных землетрясений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования корреляции добротности с геолого-геофизическими параметрами показывают, что для региона наблюдается сильная корреляция (прямая или обратная) добротности с возрастом консолидации пород земной коры, скоростью S-волн на глубинах 100 и 150 км и температурой на глубинах 50 и 100 км. Корреляция добротности с глубиной залегания кровли астеносферы и тепловым потоком на поверхности слабая. Увеличение добротности земной коры от южного Сихотэ-Алиня и Ханкайского массива к Сибирской платформе объясня-

ются не только действием температурного фактора. При этом наиболее вероятно, что глубинные температуры играют доминирующую роль в наблюдаемых изменениях добротности.

Выявленные вариации по площади коэффициентов корреляции разных параметров с добротностью характеризуются неоднородностью. Выделяются участки, где модуль коэффициента корреляции приближается к единице, и области с его минимальными значениями. Такие особенности региона необходимо учитывать при изучении современной геодинамики и прогнозировании возможных сейсмоактивных зон.

Общий коэффициент корреляции добротности с сейсмической энергией коровых землетрясений достигает умеренной величины, что позволяет рассматривать добротность одним из факторов, необходимых для оценки сейсмической опасности и прогнозирования возможных мест и силы землетрясений. В дальнейшем необходимо получение более детальных параметров затухания сейсмических волн в регионе, в том числе и с целью изучения их связи с сейсмической активностью.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках госзадания ИТиГ ДВО РАН (тема НИР № 126020216323-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абубакиров И.Р. Оценка характеристик затухания поперечных волн в литосфере Камчатки по наблюдениям цифровой широкополосной станции «Петропавловск» // Физика Земли. 2005. № 10. С. 46–58.
2. Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / Ред. К.Г. Леви, С.И. Шерман. Новосибирск: Изво СО РАН, 2005. 297 с.
3. Геодинамика, магматизм и металлогения востока России. Кн.1 / Ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Дальнаука, 2006. 572 с.
4. Горнов П.Ю., Горошко М.В., Малышев Ю.Ф., Подгорный В.Я. Геотермические разрезы земной коры области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов и смежных платформ. // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 5. С. 630–647.
5. Гусев А.А., Гусева Е.М. Оценка затухания поперечных волн в среде вблизи ст. «Петропавловск», Камчатка, по спадку спектра // Физика Земли. 2016. № 4. С. 35–51.
6. Добрынина А.А., Чечельницкий В.В., Саньков В.А. Сейсмическая добротность литосферы юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 5. С. 712–724.
7. Добрынина А.А. Затухание сейсмических волн в литосфере северной части провинции бассейнов и хребтов // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4, № 1. С. 53–67.
8. Добрынина А.А., Саньков В.А., Чечельницкий В.В., Девершер Ж. Затухание сейсмических волн в литосфере Бай-

- кальского рифта и его связь с геофизическими полями // Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых поясов и платформ: Материалы XLVIII Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2016. Т. 1. С. 144–148.
9. Забродин В.Ю., Рыбас О.В., Гильманова Г.З. Разломная тектоника материковой части Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2015. 132 с.
 10. Землетрясения в СССР. Из-во АН СССР. 1962-1991г.
 11. Землетрясения Северной Евразии 1992-2015. / Обнинск ГС РАН.
 12. Землетрясения России в 2003-2015г. / Обнинск ГС РАН.
 13. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики поля поглощения поперечных волн в литосфере Алтая и их связь с сейсмичностью // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 64–70. doi: 10.7868/S0203030616050047
 14. Коптев А.И., Ершов А.В. Термальная мощность литосферы Земли: численная модель // Вестн. Московского ун-та. Серия 4. Геология». 2011. № 5, С. 26–33.
 15. Павленкова Н.И. Структура и динамика земной коры и верхней мантии континентов // Проблемы движений и структурообразования в коре и верхней мантии. М.: Наука, 1985. 128с.
 16. Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Гонтовая Л.И., Павленкова Г.А. Глубинное строение и геодинамика Охотоморского региона // Региональная геология и металлогения. 2018. № 76. С. 70–82.
 17. Павленкова Н.И. Петрофизические особенности структуры верхней мантии северной Евразии и их природа // Петрология. 2020. Т. 28, № 3. С. 324–336. doi: 10.31857/S0869590320030048
 18. Пупатенко В.В. Затухание сейсмических волн в литосфере Приамурья // Тихоокеан. геология. 2023. Т. 42, № 1. С. 76–88. doi: 10.30911/0207-4028-2023-42-1-76-88
 19. Рассказов С.В., Ясыгина Т.А., Чувашова И.С. Мантийные источники кайнозойских вулканических пород восточной Азии: производные слэбов, подлитосферной конвекции и литосферы // Тихоокеан. геология. 2014. Т. 33, № 5. С. 47–65.
 20. Соколов С.Ю. Состояние геодинамической подвижности в мантии по данным сейсмотомографии и отношению скоростей Р и S волн // Вестн. КРАУНЦ. Науки о земле. 2014. № 2. Вып. № 24. С. 55–67.
 21. Сычева Н.А., Сычев И.В. Исследование добротности среды Северного Тянь-Шаня (Бишкекского геодинамического полигона) на основе кода-волн локальных землетрясений // Геодинамика переходных зон. 2017. № 3. С. 21–39.
 22. Тектоника, глубинное строение, металлогения области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов: Объясн. зап. к Тектонической карте м-ба 1:1 500 000 / Под ред. Л.П. Карсакова, Ч. Чжао, Ю.Ф. Мальшева, М.В. Горошко. Владивосток, Хабаровск, ДВО РАН, 2005, 264 с.
 23. Уеда С. Новый взгляд на Землю. М.: Мир, 1980. 214 с.
 24. Artemieva I.M., Mooney W.D. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, N. B8. P. 16387–16414. doi: 10.1029/2000JB900439
 25. Artemieva I.M., Billien M., Leveque J.J., Mooney W.D. Shear wave velocity, seismic attenuation, and thermal structure of the continental upper mantle // Geophys. J. Int. 2004. 157, P. 607–628. doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02195.x.
 26. Carlson, R.L. & Miller, D.J., 2003. Mantle wedge water contents estimated from seismic velocities in partially serpentinized peridotites // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, N 5. P. 1250–1253, doi:10.1029/2002GL016600.
 27. Dalton C.A., Ekström G., Dziewonski A.M. Global seismological shear velocity and attenuation: A comparison with experimental observations // Earth Planet. Sci. Lett. 2009. V. 284, N 1–2. P. 65–75. doi: 10.1016/j.epsl.2009.04.009
 28. Dobrynina A.A. Coda-wave attenuation in the Baikal rift system lithosphere // Physics of the Earth & Planet. Inter. 2011. V. 188, N 1–2. P. 121–126. doi: 10.1016/j.pepi.2011.05.008
 29. Dobrynina A.A., Sankov V.A., Chechelnitzsky V.V., Déverchère J. Spatial changes of seismic attenuation and multiscale geological heterogeneity in the Baikal rift and surroundings from analysis of coda waves // Tectonophysics. 2016. V. 675. P. 50–68. doi: 10.1016/j.tecto.2016.03.010
 30. Dobrynina A.A., Sankov V.A., Deverchere J., Chechelnitzsky V.V. Factors influencing seismic wave attenuation in the lithosphere in continental rift zones // Geodynamics & Tectonophysics. 2017. V. 8, N 1. P. 107–133. doi: 10.5800/GT-2017-8-1-0234
 31. Kumar N., Yadav D.N. Coda Q estimation for Kinnaur region and surrounding part of NW Himalaya // J. Seismology. 2019. V. 23. P. 271–285. doi: 10.1007/s10950-018-9805-2
 32. Liu K.H., Gao S.S., Gao Y., Wu J. Shear wave splitting and mantle flow associated with the deflected Pacific slab beneath northeast Asia // J. Geophysical Research: Solid Earth. 2008. V. 113(B1): B01305, doi: 10.1029/2007JB005178.
 33. Ma J., Tian Y., Liu C., Zhao D., Feng X., Zhu H. P-wave tomography of Northeast Asia: Constraints on the western Pacific plate subduction and mantle dynamics // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2018. V. 274. P. 105–126. doi: 10.1016/j.pepi.2017.11.003.
 34. Mak S., Chan L.S., Chandler A.M., Koo R. Coda Q estimates in the Hong Kong region // J. Asian Earth Sci. 2004. V. 24. P. 127–136. doi: 10.1016/j.jseaes.2003.10.001
 35. Mitchell B.J., Pan Y., Xie J., Cong L. Lg coda Q variation across Eurasia and its relation to crustal evolution // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 1997. V. 102, N B10. P. 22767–22779. doi: 10.1029/97JB01894
 36. Mitchell B.J., Cong L., Ekström G. A continent-wide map of 1-Hz Lg coda Q variation across Eurasia and its relation to lithospheric evolution // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, N B4. B04303. doi: 10.1029/2007JB005065
 37. Mitchell B.J., Cong L., Jemberie A.L. Continent-wide maps of Lg coda Q for North America and their relationship to crustal structure and evolution // Bull. Seismological Soc. of America. 2015. V. 105, N 1. P. 409–419. doi: 10.1785/0120130235
 38. Ranasinghe N.R., Gallegos A., Hearn T., Ni J., Sandvol E. Frequency-dependent Lg attenuation in Northeast China and its implications // Geophys. Journ. Internat. 2018. V. 212, N 3. P. 2131–2142. doi: 10.1093/gji/ggx522
 39. Wyllie, P. J. Magma genesis, plate tectonics, and chemical differentiation of the Earth // Rev. Geophys. 1988, V. 26, N 3. P. 370–404. doi: 10.1029/RG026i003p00370
 40. Xie J., Nuttli O.W. Interpretation of high-frequency coda

at large distances: Stochastic modeling and method of inversion // *Geophys. J.* 1988. V. 95. P. 579–595.

doi: 10.1111/j.1365-246X.1988.tb06705.x

41. Zhao L.F., Xie X.B., Wang W.M., Zhang J.H., Yao Z.X. Seismic Lg-wave Q tomography in and around Northeast China // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2010. V. 115, N B8. B08307. doi: 10.1029/2009JB007157

Рекомендована к печати В.Г. Быковым

после доработки 30.12.2025 г.

принята к печати 16.01.2026 г.

FACTORS OF SEISMIC WAVE ATTENUATION IN THE AMUR REGION AND ADJACENT TERRITORY

T.V. Merkulova, V.V. Pupatenko

Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia;
e-mail: merkulova@itig.as.khb.ru, pvv2.dv@yandex.ru

This study analyzes correlations between the crustal seismic quality factor (Q-factor) and several geophysical parameters in the Amur Region and adjacent territories. These parameters include the age of tectonic activation, deep-layer velocity structure, released seismic energy from crustal earthquakes, lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) depth, surface heat flow, and estimated temperatures at 50 and 100 km depth. The results indicate that the Q-factor shows a high correlation with the age of tectonic activation, S-wave velocity, and temperature, a moderate correlation with the released seismic energy, and only a weak correlation with the LAB depth and surface heat flow. Mapping the spatial variations in Q-factor correlation coefficients and the above parameters suggests that the combined effects of temperature heterogeneity and fluid content in the upper mantle and crust most likely explain the observed patterns. The heterogeneity may, in turn, be attributed to the influence of the Pacific subduction zone.

Key words: seismic waves, attenuation, quality factor, lithosphere, heat flow, correlation of geophysical parameters, Amur region, Primorye.