

ЭМПИРИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ УРОВНЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, МОМЕНТНОЙ МАГНИТУДОЙ И ТЕКТОНИЧЕСКИМ ТИПОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

А.В. Коновалов, Ю.А. Степнова

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия; e-mail: stepnova@fegi.ru

Поступила в редакцию 8 апреля 2025 г.

Прогнозирование уровня сейсмических воздействий является важнейшей задачей научного сообщества. Развиваемая в последние годы методология оценки сейсмической опасности и синтеза сейсмических записей основывается на модели очага землетрясения с фрагментарными субисточниками высокочастотного излучения. Ключевым параметром, отождествляемым с высокочастотными излучателями, является очаговый спектр ускорения и его высокочастотный уровень. В настоящей работе для параметризации высокочастотного уровня спектра ускорений используется моментная магнитуда и глубина очага, а также дополнительные предикторы в виде категориальных переменных, описывающих сеймотектонический тип землетрясения, его механизм очага и региональные особенности. Полученные результаты позволяют ранжировать уровень сейсмических воздействий для различных геодинамических условий, реализованных на территории России.

Ключевые слова: землетрясение, фокальный механизм, сброшенное напряжение, asperity, спектр Фурье, тектоника.

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения представляют собой сложный нелинейный геодинамический процесс, оказывающий значительное влияние на безопасность и хозяйственную деятельность человека. Таким образом, совершенствование параметрических моделей, описывающих вероятностные характеристики и разрушительный потенциал землетрясений, остается актуальной задачей по мере накопления эмпирических данных и развития теоретической базы.

Известно, что механизм распространения фронта разрыва при землетрясении неоднороден как в пространстве, так и во времени. Плавные (когерентные) компоненты процесса разрушения влияют на генерацию длиннопериодных волн, тогда как случайные локальные (некогерентные) компоненты контролируют преимущественно высокочастотный уровень сейсмических колебаний. При этом, если первые удовлетворительно описываются с помощью детерминистических физических моделей, то для прогноза влияния последних необходимо использовать стохастические математические подходы. Кроме того, в последнее десятилетие развивается теория [1, 3, 6, 7, 11, 28, 30

и др.], которая свидетельствует о важной роли локальных неровностей/неоднородностей (англ. – asperity) в очаге землетрясения в определении характеристик генерируемого высокочастотного излучения (рис. 1, а). Эти неровности представляют собой участки повышенной прочности или повышенного сцепления контактирующих по очаговому разлому пород, на которых скорость распространения разрыва и высвобождение сейсмической энергии многократно возрастает по сравнению с фоновой частью разлома. Таким образом, сила наиболее разрушительных для зданий и сооружений высокочастотных колебаний, которая в значительной мере задается присутствием в очаге землетрясения локальных неровностей, может существенно различаться среди землетрясений с одинаковой магнитудой. Соответственно, для целей моделирования ключевым измеряемым параметром, отождествляемым с локальными неровностями, является высокочастотный (короткопериодный) уровень очагового спектра ускорений (рис. 1, б). Амплитудная характеристика высокочастотного излучения задается физическими и материальными константами согласно [14]:

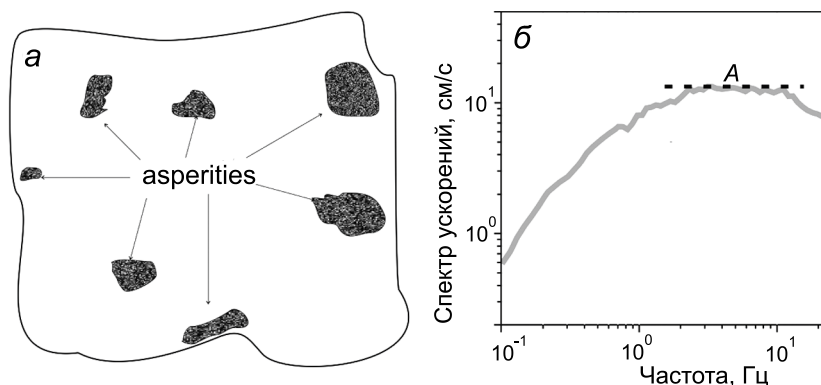


Рис. 1. Модель разрыва с локальными субочагами в виде asperity (а) и генерируемый ими высокочастотный (короткопериодный) уровень очагового спектра ускорений (б).

$$A = 4\pi \left(\frac{S_a}{\pi}\right)^{0.5} \beta^2 \Delta\tau, \quad (1)$$

где A – уровень очагового (высокочастотного) спектра ускорений, S_a – общая площадь локальных неровностей (asperity), β – скорость S-волны в области очага землетрясения, $\Delta\tau$ – среднее сброшенное напряжение на локальных неровностях; в (1) учтено, что физически измеряемый спектральный параметр A умножен на $4\pi\rho\beta^3$, где ρ – плотность среды в области очага землетрясения; величина S_a , как правило, в пять раз меньше площади всего разрыва.

Реконструкция очагового спектра чаще всего подразумевает оценку низкочастотного спектра смещений, определяющего важнейшую физическую характеристику – скалярный сейсмический момент очага землетрясения. Однако особый интерес представляет оценка спектра ускорений в целом и параметризация его высокочастотного уровня [2]. Природа формирования высокочастотного некогерентного фронта разрушений изучается по сей день, и исследование данного явления не теряет своей актуальности. Важным моментом является использование накопленных данных для исследования скейлинга (обобщенного подобия) между высокочастотными и низкочастотными характеристиками спектра.

Данный вопрос активно рассматривался разными исследователями на примере различных сейсмически активных регионов [6, 15, 19, 29, 33, 34 и др.]. В настоящей работе собраны и проанализированы очаговые параметры землетрясений по всему миру, происходивших в различных тектонических условиях, для которых определена характеристика высокочастотного спектра ускорений. Цель работы состоит в актуализации эмпирической модели высокочастотного излучения.

ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ТИПЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Тектонический режим является важным фактором, влияющим на параметры землетрясений. В данной работе принято разделение землетрясений на следующие четыре тектонических типа, в целом базирующееся на принятых в сейсмологии классификациях [9]: межплитовые (1) и внутрислэбовые (2) субдукционные землетрясения, коровые землетрясения (3) и особый тип «преджелобовых» землетрясений (4). Примерное расположение очагов разных типов землетрясений в структуре конвергентной окраины показано на схеме (рис. 2).

Межплитовые землетрясения происходят в зонах субдукции на границе погружающейся (слэба) и вышележащей плит (рис. 2). Землетрясения этого типа составляют более 90 % от общего количества событий во всем мире. Как правило, межплитовые землетрясения в зонах субдукции локализованы в области вдоль контакта двух плит, при взаимодействии которых накапливается упругое напряжение, реализуемое через периодическое высвобождение энергии в виде землетрясения, глубина распространения этих землетрясений, как правило, не превышает 70 км.

Внутрислэбовые землетрясения (иногда именуемые внутриплитными и внутриплитовыми) происходят внутри погружающейся океанической плиты (рис. 2). Известны случаи достаточно разрушительных внутрислэбовых землетрясений. Несмотря на то, что они занимают не более 10 % от общего количества землетрясений в мире, ими наносится значительный ущерб зданиям и сооружениям. Глубина их распространения варьирует в широком диапазоне от 70 км (среднеглубинные) до 700 км (глубокофокусные) землетрясения. Данные события характеризуются от-

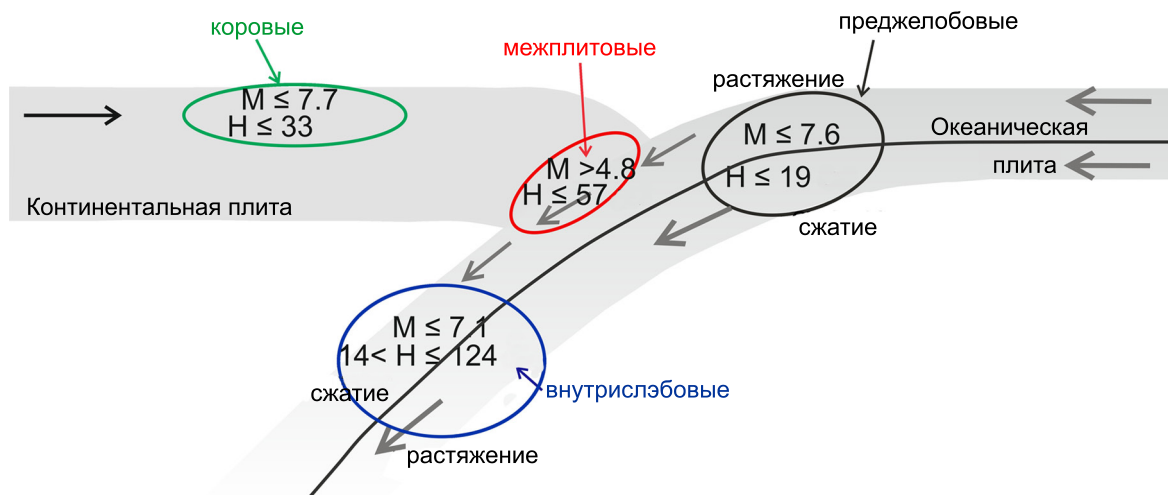


Рис. 2. Схема субдукции океанической плиты под континент и сейсмотектонического процесса рассматриваемых сейсмических событий.

носителем большей интенсивностью сейсмических колебаний в отличие от межплитовых событий, что может быть связано с высоким напряжением в слэбе, локальным (компактным) очагом и эффективным распространением волн через плотную глубинную среду.

Коровые события представлены подвижками, происходящими в земной коре на глубине примерно до 35–40 км, и, как правило, они приурочены к системам региональных разломов в сейсмически активных регионах, поблизости от границ литосферных плит (рис. 2). Отдельно в данной работе рассматривается тектонический тип землетрясений, называемых здесь «преджелобовыми», а в англоязычной литературе именуемый «outer rise», «trench» или «bending» [5]. События данного типа происходят внутри океанической плиты на её изгибе при погружении в зону субдукции (рис. 2), в связи с чем в некоторых классификациях их относят к внутрислабовым. Глубина очагов таких землетрясений не превышает 25 км.

Авторами настоящей статьи собраны опубликованные данные по реконструированным очаговым спектрам ускорений землетрясений, происходивших в различных сейсмоактивных районах Земли [6, 10, 13, 15, 19, 21–27, 29, 30, 31, 35]. В упомянутых статьях используются многоэтапные способы реконструкции очагового спектра по сейсмическим записям, в ходе которых оцениваются характеристики затухания и геометрического расхождения сейсмических волн, после чего производится соответствующая коррекция и восстановление средних характеристик спектра, «приведенного» к очагу.

В общей сложности проанализировано 210 значений спектрального параметра. Для некоторых зем-

летрясений существует несколько оценок высокочастотного уровня, произведенных разными авторами с помощью разных методик. Такого рода дубликаты не отбраковывались и использовались в расчетах как независимые оценки.

Большая часть использованных данных относится к Японии, также исследовались очаговые спектры землетрясений территорий США, Мексики, Турции, Канады, Китая, Тайваня и Ирана. База данных имеет обширный магнитудный диапазон $M_w = 4.0$ – 9.1 , глубина очага варьируется от 1 до 124 км.

Соотношение количества событий разных тектонических типов приведено на диаграмме (рис. 3, а). По внутрислабовым и преджелобовым землетрясениям использованы данные по Японии, а по межплитовым – Японии и Мексики.

Исследуемые коровые события распространены в структурах Тихоокеанского (Япония, Тайвань, Канада и США) и Альпийско-Гималайского (Китай, Иран и Турция) складчатых поясов. В Западной Пацифике они связаны со субдукцией Тихоокеанской и Филиппинской плит (Япония и Тайвань), а на западной окраине Североамериканского континента (США и Канада) являются следствием его сложного взаимодействия с океаническими плитами – субдукцией плиты Хуан-де-Фука и трансформным скольжением Тихоокеанской плиты. В пределах Альпийско-Гималайского пояса (Китай, Иран и Турция) сейсмическая активность обусловлена коллизией Индийской и Аравийской плит с Евразийской плитой, в том числе сопровождающими её сдвиговыми смещениями.

По типу механизма (рис. 3, б) стоит отметить преобладание взбросов для межплитовых землетрясе-

ний и сбросов для преджёлобовых событий. Коровые землетрясения реализуются как в виде взброса/сброса так и сдвига, не отождествляясь с одним доминирующим типом фокального механизма.

Данные о моментной магнитуде и глубине очага землетрясения брались с сайта Геологической службы США [15]. Если такие данные отсутствовали, то использовались сводки, публикуемые на сайтах региональных сейсмологических агентств: для японских землетрясений это ресурсы F-Net [17, 18] и K-Net [16]. При отсутствии данных о моментной магнитуде применялась формула Х. Канамори [12] для расчета M_w по величине скалярного сейсмического момента (M_0), приводимой в анализируемых статьях:

$$M_w = (2/3) (\lg M_0 [\text{Н м}] - 9.1). \quad (2)$$

МЕТОДОЛОГИЯ

В настоящей работе использовались как обычные линейные регрессионные модели, так и модели со смешанными эффектами. Расчеты выполнялись с помощью библиотеки Statsmodels 0.14.4 языка программирования Python [32].

Обычная линейная регрессионная модель с несколькими предикторами задается выражением:

$$y_k = \alpha + \sum_{p=1}^P \beta_p x_{pk} + \varepsilon_k, \quad k = 1, \dots, K, \quad p = 1, \dots, P, \quad (3)$$

где y – зависимая переменная, $x = \{x_1, \dots, x_p\}$ – набор предикторов, α и $\beta = \{\beta_1, \dots, \beta_p\}$ – неизвестные коэффициенты, которые требуется определить, ε_k – взаимно независимые случайные ошибки, подчиняющиеся нормальному распределению с нулевым средним и заданным стандартным отклонением σ , K – количество измерений, P – количество предикторов.

В классическом регрессионном анализе предполагается, что наблюдения (измерения) принадлежат одной и той же генеральной совокупности (популяции), они являются независимыми и одинаково распределенными. Данные смешанной модели имеют более сложную, многоуровневую и чаще всего иерархическую структуру. Измерения, соответствующие разным уровням или группам, считаются независимыми, но наблюдения внутри группы коррелируют друг с другом, поскольку они принадлежат одной и той же субпопуляции (например, [8]). Если измерения группируются по определенным признакам, то выражение (3) можно переписать:

$$y_{ij} = \alpha_i + \sum_{p=1}^P \beta_p x_{pji} + \varepsilon_{ij}, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, n_i, \quad (4)$$

где N – количество групп, n_i – количество измерений в i -ой группе.

Модель (4) строится на предположении о том, что значения угловых коэффициентов (β) неизменны в каждой группе, в то время как свободный член регрессии (α) может меняться от группы к группе, т.е.

$$\alpha_i = \alpha + b_i. \quad (5)$$

При этом случайная переменная b_i следует нормальному распределению (независимо от ε) с нулевым средним и стандартным отклонением σ_b , поэтому α есть не что иное, как среднее по всем группам и наблюдениям. С учетом (5) регрессионную модель (4) можно переписать:

$$y_{ij} = \alpha + \sum_{p=1}^P \beta_p x_{pji} + \eta_{ij}, \quad (6)$$

где $\eta_{ij} = b_i + \varepsilon_{ij}$ – общая случайная ошибка с нулевым средним и стандартным отклонением $\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_b^2}$,

учитывающим вклады межгрупповой (σ_b^2) и внутригрупповой (σ^2) дисперсий.

Искомая модель строится таким образом, что субпопуляцией генеральной совокупности является выборка данных, отнесенная к конкретному сейсмическому региону. Тогда изменчивость наблюдений от региона к региону характеризует групповые (фиксированные) эффекты, а случайные ошибки, не зависящие от региональных аспектов, соответственно, относятся к случайным эффектам. Общепринятым в сейсмологии является так называемый эргодический подход, согласно которому характер затухания сейсмических воздействий определяется тектоническим типом землетрясения, а также характеристиками очага и среды, а значит региональная специфика определяется исключительно физическими (измеряемыми) параметрами. Недавние исследования показали, что при одинаковых входных данных амплитуды колебаний претерпевают разброс от региона к региону. Это послужило развитию неэргодического подхода, учитывающего непараметрические региональные особенности [4]. Предлагаемая в настоящей статье модель по своей сути следует неэргодическому подходу.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как отмечалось ранее, цель настоящего исследования – поиск устойчивых эмпирических связей между уровнем высокочастотного спектра ускорений и моментной магнитудой с привлечением дополнительных предикторов в виде числовых и категориальных переменных. К дополнительным предикторам относятся глубина очага, сеймотектонический тип землетрясения, тип фокального механизма и принадлежность к определенной сейсмогенерирующей области.

Для оценки зависимости между рассматриваемыми переменными построена корреляционная матрица в виде «тепловой карты» (рис. 4), цвета которой соответствуют значению коэффициента корреляции (ρ). Данный рисунок показывает вполне ожидаемую корреляцию ($|\rho| = 0.83$) между зависимой переменной (логарифм амплитудного спектра) и моментной

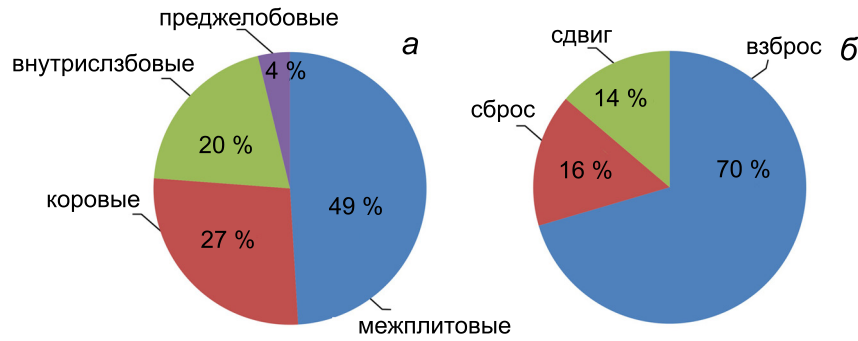


Рис. 3. Распределение исходных данных по тектоническому типу (а) и типу фокального механизма (б) землетрясений в процентных соотношениях.

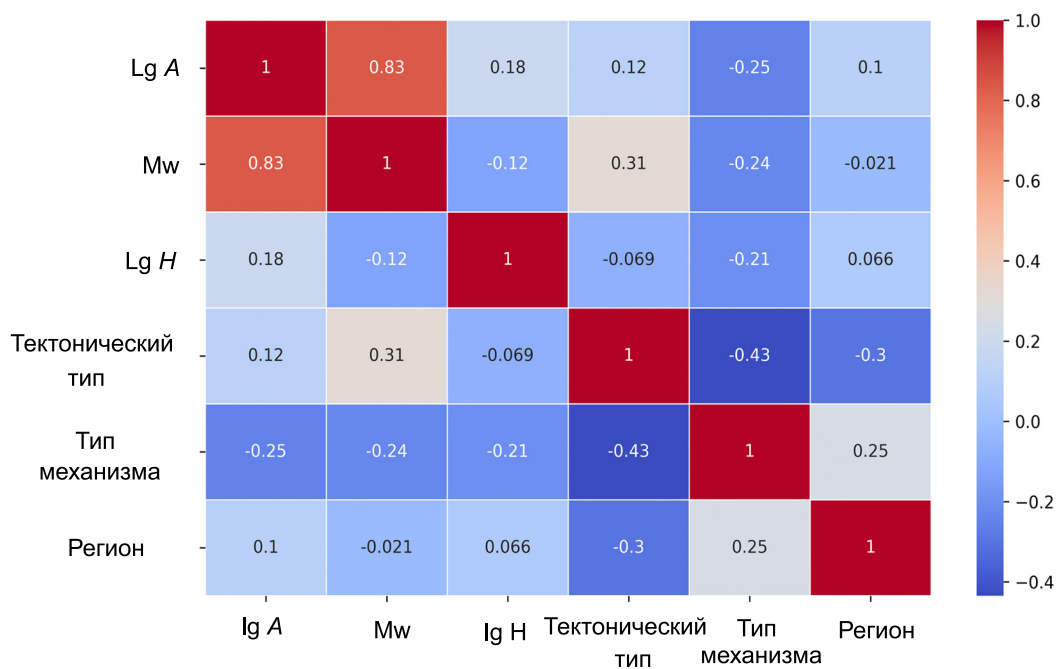


Рис. 4. Матрица корреляций. На пересечении строк и столбцов приведены коэффициенты корреляции для соответствующей пары признаков.

магнитудой. Вместе с тем, относительно высоким абсолютным значением коэффициента корреляции ($|r| = 0.43$) характеризуется пара предикторов «сейсмотектонический тип» – «тип механизма». Корреляция данных переменных обусловлена, по всей видимости, приуроченностью определенных механизмов к некоторым тектоническим типам землетрясений. В частности, взброс почти всегда реализуется в случае межплитового типа подвижки, а сброс – в океанической коре.

Для диагностики предложенных предикторов и оценки их влияния на спектральные измерения произведены оценка коэффициентов с помощью обычной регрессии и анализ невязок в рамках модели:

$$\lg A_i = \alpha + \beta_M * Mw_i, \quad (7)$$

где α и β_M – коэффициенты, подлежащие определению, i – номер наблюдения.

Невязка (остаточная разность между измеренным и расчетным значениями) задается следующим образом:

$$Res_i = y_i - \hat{y}_i, \quad (8)$$

где y и $\hat{y}$ – измеренное и прогнозные значения, соответственно.

В результате подгонки коэффициент β_M составил 0.469, что близко к теоретическому значению 0.5, согласно (1). Коэффициент детерминации (R^2) составил 0.695, а стандартное отклонение – 0.333 (рис. 5).

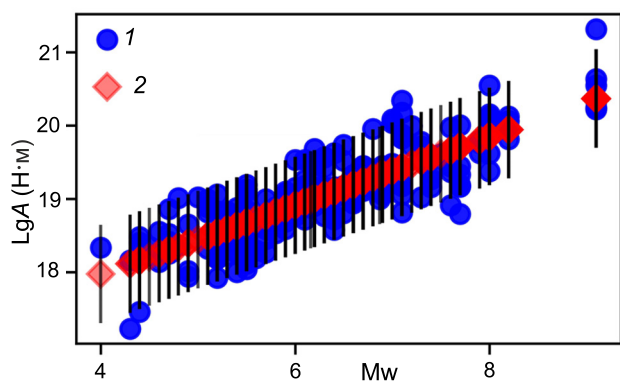


Рис. 5. Результаты статистической подгонки модели высокочастотного излучения ($\lg A$) с одним предиктором (M_w) с помощью обычной линейной регрессии.

1 – измеренные значения высокочастотного уровня спектра ускорений, 2 – расчетные значения с отметкой 95 % доверительного интервала.

Диагностические графики представлены на рис. 6–7. Из рис. 6, а видно, что среднее значение невязки довольно близко к нулевой линии, что говорит о корректности модели (7) в части магнитудной зависимости. Однако те же самые невязки на графике, зависящем от глубины очага, имеют явный тренд, что говорит о влиянии фокальной глубины на прогнозные значения.

На рис. 7 представлено распределение невязок в зависимости от категориальных переменных. Отчетливо видны систематические различия усредненных невязок, отнесенных к разным тектоническим типам землетрясений (рис. 7, б). Это лишний раз свидетельствует о зависимости уровня очагового спектра уско-

рений от сейсмотектонической обстановки в области сейсмогенерирующих разломных зон.

Амплитудные характеристики сейсмических колебаний зависят не только от сейсмотектонического типа [9], но и типа фокального механизма землетрясения. Как правило, взбросы характеризуются относительно более высокими сброшенными напряжениями, в то время как сбросы – низкими [28]. Однако в нашем случае влияние типа фокального механизма на высокочастотный спектр довольно слабое (рис. 7, в). Более того, наблюдается обратная картина: сбросы в среднем характеризуются чуть более высокими амплитудами высокочастотного излучения по сравнению со взбросовыми подвижками. По мнению авторов статьи, главенствующим фактором, влияющим на амплитуду высокочастотного излучения, является тип напряженного состояния (сжатие, растяжение или смешанное состояние). Известно, что взбросы реализуются в условиях горизонтального сжатия, в то время как сбросы – горизонтального растяжения. Для сдвиговых сейсмодислокаций характерны одновременно действующие напряжения горизонтального сжатия и растяжения. Любая зона субдукции уходит на глубину наклонно, причем наклон зависит от конфигурации слэба. У поверхности характерны небольшие углы наклона, в то время как с ростом глубины угол наклона монотонно возрастает. Для некоторых типов субдукции встречаются участки, на которых слэб выполаживается. Причиной неравномерной крутизны погружающегося в мантию слэба и соответствующих перегибов считают уплотнение пород субдуцирующей литосферы вследствие фазового перехода минералов. Если обратить внимание на взаимодействие плит в эпиконтинентальных зонах субдукции, то об-

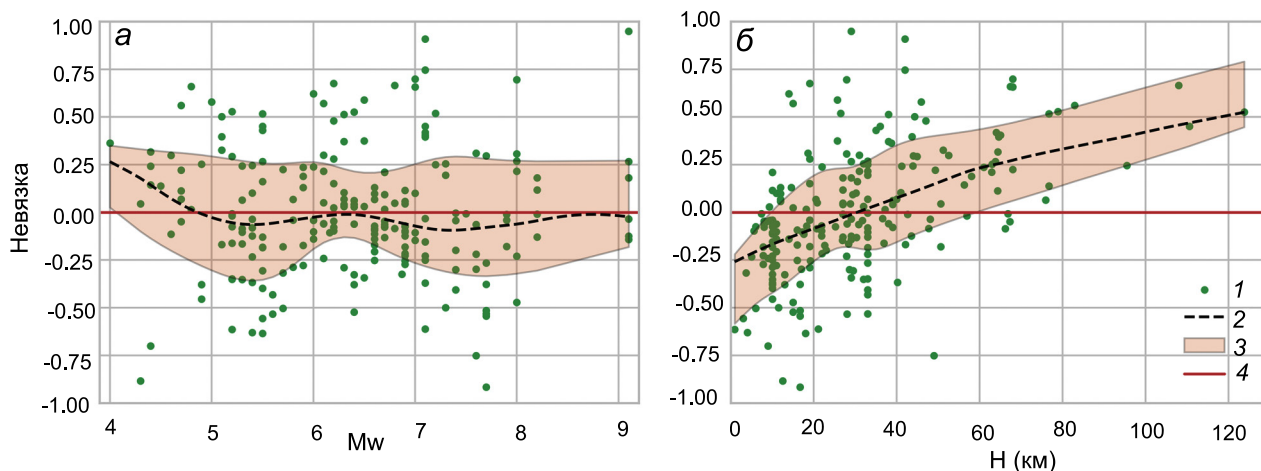


Рис. 6. Зависимость остаточной разности (невязки) от моментной магнитуды (а) и глубины очага (б).

1 – индивидуальное значение, 2 – 80 % интервал прогнозирования, 3 – средняя линия, 4 – нулевая линия.

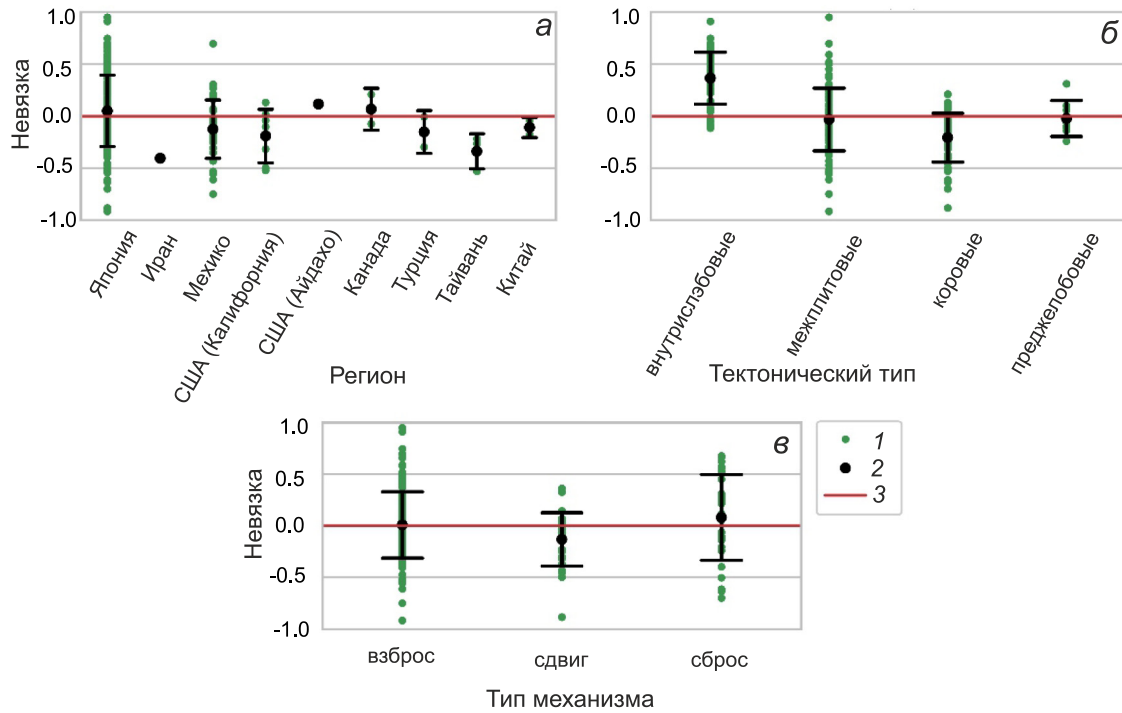


Рис. 7. Зависимость остаточной разности (невязки) от категориальных предикторов.

a – сейсмический регион, *б* – тектонический тип землетрясения, *в* – тип фокального механизма. Обозначения: 1 – индивидуальная невязка, 2 – среднее значение невязки и стандартное отклонение, 3 – нулевая линия.

наружится, что в погружающемся океаническом слэбе на некоторых участках реализуются напряжения сжатия, а на других – растяжения. Однако, из-за того, что рассматриваемые участки находятся под углом к поверхности, типичные надвиги (в системе координат слэба) в привычной для сейсмолога проекции на нижнюю или верхнюю фокальные полусферы будут интерпретироваться как сбросы, и наоборот. Поэтому тип фокального механизма не является объективным параметром для корректной параметризации амплитуды высокочастотного излучения. Однако для коровых землетрясений тип механизма остается по-прежнему приемлемой характеристикой, отождествляемой с напряженным состоянием. По этой причине предлагается следующая параметризация событий по тектоническому типу с учетом механизма очага: «межплитовые», «внутрислэбовые», «преджелобовые», «коровые взброс», «коровые сдвиг» и «коровые сброс». Такое ранжирование позволяет избежать взаимодействия между предикторами, отмеченного ранее.

Таким образом, очаговый спектр ускорений (A , Н м/с^2) будет задаваться моментной магнитудой (M_w), глубиной очага (H , км) и сеймотектоническим типом землетрясения:

$$\lg A = \alpha + \beta_M \cdot Mw + \beta_H \cdot \lg H + \beta_{RF} \cdot tt_{RF} + \beta_{SS} \cdot tt_{SS} + \beta_{NF} \cdot tt_{NF} + \beta_{outer} \cdot tt_{outer} + \beta_{inter} \cdot tt_{inter} \quad (9)$$

где α , β_M , β_H , β_{RF} , β_{SS} , β_{NF} , β_{outer} и β_{inter} – неизвестные коэффициенты, которые необходимо определить; сеймотектонический тип события задается следующим образом:

«коровые взброс»: $tt_{RF}=1, tt_{SS}=0, tt_{NF}=0, tt_{outer}=0, tt_{inter}=0$;
«коровые сдвиг»: $tt_{RF}=0, tt_{SS}=1, tt_{NF}=0, tt_{outer}=0, tt_{inter}=0$;
«коровые сброс»: $tt_{RF}=0, tt_{SS}=0, tt_{NF}=1, tt_{outer}=0, tt_{inter}=0$;
«преджелобовые»: $tt_{RF}=0, tt_{SS}=0, tt_{NF}=0, tt_{outer}=1, tt_{inter}=0$;
«межплитовые»: $tt_{RF}=0, tt_{SS}=0, tt_{NF}=0, tt_{outer}=0, tt_{inter}=1$;
«внутрислэбовые»: $tt_{RF}=0, tt_{SS}=0, tt_{NF}=0, tt_{outer}=0, tt_{inter}=0$.

Свободный член α в предложенной модели характеризует среднемировое значение, в то время как региональные поправки определяются в ходе наилучшей подгонки модели (9) методом регрессии со смешанными эффектами.

Сводка найденных коэффициентов модели приведена в таблице 1. Среднеквадратичное значение невязки составило 0.246. Стандартное отклонение эмпирического соотношения уменьшилось почти на 30 % с введением в модель дополнительных предикторов. Результаты вычислений также показывают, что вариации от региона к региону относительно небольшие (табл. 2).

Из табл. 1 видно, что внутрислэбовые события сильно отличаются от остальных тектонических ти-

Таблица 1. Сводка коэффициентов эмпирической модели очагового спектра ускорений.

Коэффициент	Значение	Стандартная ошибка	$P > t $
α	15.695	0.196	0.000
β_M	0.530	0.018	0.000
β_H	0.218	0.086	0.011
β_{RF} («коровые взбросы»)	-0.408	0.093	0.000
β_{SS} («коровые сдвиг»)	-0.505	0.096	0.000
β_{NF} («коровые сбросы»)	-0.599	0.119	0.000
β_{outer} («преджелобовые»)	-0.305	0.115	0.008
β_{inter} («межплитовые»)	-0.370	0.062	0.000

Таблица 2. Региональные поправки эмпирической модели очагового спектра ускорений.

Сейсмический регион	Коэффициент b (региональная поправка к свободному члену регрессии)
Иран	-0.038
Канада	0.048
Китай	-0.012
Мехико	-0.033
США (Айдахо)	0.047
США (Калифорния)	0.009
Тайвань	-0.083
Турция	0.011
Япония	0.050

пов землетрясений. Генерируемый внутрислэбовыми событиями высокочастотный спектр в среднем в 2-4 раза выше по уровню, чем аналогичная характеристика для коровых и межплитовых землетрясений.

Можно также отметить положительную корреляцию высокочастотного уровня спектра ускорений с глубиной очага. Согласно выражению (1), амплитудный фактор зависит от скорости S-волны в окрестностях очага землетрясения, которая в свою очередь имеет тенденцию к увеличению с ростом глубины. Поэтому данный эффект отражается на характеристиках спектра. Например, различие в 1.65 раза между высокочастотными амплитудами соответствует очagam, залегающим на глубинах 10 и 100 км.

Влияние механизма очага корового землетрясения на спектр довольно сильное. Об этом свидетельствует проверка гипотезы о значимости соответствующих коэффициентов, приведенная в табл. 1. Обычно, если статистический тест ($P > |t|$) демонстрирует значения менее 0.05, то гипотеза принимается. Генерируемый взбросовыми подвижками высокочастотный спектр в среднем в 1.55 раза выше по уровню, чем аналогичная характеристика для сбросов. Сдвиги

в среднем характеризуются промежуточными значениями амплитуды относительно взбросовых и сбросовых подвижек. Найденные эффекты были обнаружены ранее для Японии [20]. Новизна разработанной модели состоит в том, что в настоящем исследовании использовалась обширная мировая выборка данных, а также методика подгонки, основанная на регрессионной модели со смешанными эффектами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очаг землетрясения в структурном плане представляет собой комбинацию зон asperity и фоновой части разрыва (где нет asperity), каждая из которых характеризуется своими излучательными особенностями. Зоны asperity являются источниками высокочастотного некогерентного излучения, на них в процессе распространения фронта разрыва в толще земной коры высвобождается основная (высокочастотная) сейсмическая энергия, представляющая опасность для зданий и сооружений.

На основе собранной статистики были сделаны выводы о непосредственной связи высокочастотного уровня очагового спектра ускорений со скалярным сейсмическим моментом, тектоническим типом, механизмом и глубиной очага землетрясения. Разработана модель, связывающая указанные параметры в виде среднемирового эмпирического соотношения. Для этого использовались опубликованные данные в различных сейсмоактивных районах Земли.

Исследования показали, что уровень высокочастотных колебаний, генерируемый сильными землетрясениями внутри слэба, отличается от аналогичной характеристики других тектонических типов землетрясений. Анализ значительного массива сейсмических данных подтверждает, что внутрислэбовые события характеризуются повышенным уровнем высокочастотного излучения, что может быть связано с реализацией более высоких сброшенных напряжений на

локальных asperity в слабее. С ростом глубины очага увеличивается уровень высокочастотного излучения, а подвижки, происходящие в условиях сжатия, характеризуются более высоким уровнем высокочастотного излучения относительно режима растяжения.

Исследования также показали важность разработки методик реконструкции очагового спектра ускорений и оценки его высокочастотного уровня для понимания механизмов сейсмического излучения.

Исследование выполнено по Госзаданию ДВГИ ДВО РАН.

Благодарности. Авторы благодарят к.г.-м.н. И.А. Александрова за ценные обсуждения, экспертные советы и критические замечания, которые значительно улучшили работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А.А. Стохастическое моделирование протяженного очага землетрясения для характеристики сейсмической опасности. 1. Обоснование и общая структура алгоритма // *Вопр. инженерной сейсмологии*. 2013. Т. 40, № 1. С. 5–18.
2. Гусев А.А., Сорокина А.А., Чебров Д.В. Очаговые спектральные параметры землетрясений Восточной Камчатки диапазона $M_w = 3-6$ по данным поперечных волн // *Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2017. № 3. С. 36–49.
3. Коновалов А.В., Воронезцева Э.Е., Степнова Ю.А. Пространственные неоднородности вектора подвижки протяженных очагов землетрясений в районе Курило-Камчатского сегмента Тихоокеанской зоны субдукции // *Вестн. ДВО РАН*. 2024. № 2. С. 17–35.
DOI: 10.31857/S0869769824020025, EDN: ldwgvs.
4. Atik L.A., Abrahamson N., Bommer J.J., Scherbaum F., Cotton F., Kuehn N. The Variability of Ground-Motion Prediction Models and Its Components // *Seismological Research Letters*. 2010. V. 81, N 5. P. 794–801. DOI: 10.1785/gssrl.81.5.794.
5. Christensen D.H., Ruff L.J. Seismic coupling and outer rise earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93 (B11). P. 13421–13444. DOI:10.1029/JB093iB11p13421.
6. Dan K., Watanabe M., Sato T., Ishii T. Short-period source spectra inferred from variable-slip rupture models and modeling of earthquake faults for strong motion prediction by semi-empirical method // *J. Struct. Constr. Eng.* 2001. V. 66, I. 545. P. 51–62. DOI:10.3130/aijs.66.51_4.
7. Dan K., Tohdo M., Oana A., Ishii T., Fujiwara H., Morikawa N. Heterogeneous Dynamic Stress Drops on Asperities in Inland Earthquakes Caused by Very Long Faults and Their Application to the Strong Ground Motion Prediction. In: Kamae, K. (eds) *Earthquakes, Tsunamis and Nuclear Risks*. Springer, Tokyo. 2016. DOI:10.1007/978-4-431-55822-4_7.
8. Demidenko E. Front Matter. In *Mixed Models*, E. Demidenko (Ed.). 1987. DOI: 10.1002/9781118651537.fmatter.
9. García D., Wald D.J., Hearne M.G. A global earthquake discrimination scheme to optimize ground-motion prediction equation selection // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2012. V. 102, N 1. P. 185–203. DOI: 10.1785/0120110124.
10. González J., Irikura K. Source Characterization of Mexican Subduction Earthquakes from Acceleration Source Spectra for the Prediction of Strong Ground Motions // *Bulletin of The Seismological Society of America*. 2007. V. 97.
DOI: 10.1785/0120050156.
11. Irikura K., Miyake H. Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios // *Pure Appl. Geophys.* 2011. V. 168, I. 1–2. P. 85–104.
DOI: 10.1007/s00024-010-0150-9.
12. Kanamori H. The energy release in great earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82, N 20. P. 2981–2987.
DOI: 10.1029/JB082i020p02981.
13. Kataoka S., Satoh T., Matsumoto S., Kusakabe T. Attenuation relationships of ground motion intensity using short period level as a variable // *Doboku Gakkai Ronbunshuu A*. 2006. V. 62. P. 740–757. DOI:10.2208/jsceja.62.740.
14. Madariaga R. High-frequency radiation from crack (stress drop) models of earthquake faulting // *Geophys. J. Int.* 1977. V. 51, I. 3. P. 625–651.
DOI: 10.1111/j.1365-246X.1977.tb04211.x.
15. National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. <https://earthquake.usgs.gov>.
16. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. NIED K-NET, KiK-net. DOI:10.17598/NIED.0004.
17. Obara K., Kasahara K., Hori S., Okada Y. A densely distributed high-sensitivity seismograph network in Japan: Hi-net by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention // *Review of Scientific Instruments*. 2005. V. 76, P. 021301–021301. DOI:10.1063/1.1854197.
18. Okada Y., Kasahara K., Hori S., Obara K., Sekiguchi S., Fujiwara H., Yamamoto A. Recent progress of seismic observation networks in Japan -Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net // *Earth, Planets and Space*. 2004. V. 56. P. 15–28.
DOI: 10.1186/BF03353076.
19. Satoh T. Short-period Spectral Level of Intraplate and Interplate Earthquakes Occurring off Miyagi Prefecture // *J. JAEE*. 2004. V. 4. P. 1–4. DOI: 10.5610/jaee.4.1.
20. Satoh T. Influence of fault mechanism, depth, and region on stress drops of small and moderate earthquakes in Japan // *Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE*. 2006. V. 23, N. 1. P. 125s–134s.
21. Satoh T. Scaling law of short-period source spectra for crustal earthquakes in Japan considering style of faulting of dip-slip and strike-slip // *J. of Structural and Construction Engineering (transactions of Aij)*. 2010. V. 75. P. 923–932. DOI: 10.3130/aijs.75.923.
22. Satoh T. Inversion of source model of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake using empirical Green's function method. 2012. 15th World Conference on Earthquake Engineering 2012. September 2012. Lisbon, Portugal.
23. Satoh T., Tsutsumi H. Short-period Spectral Level, Path and Site-amplification Derived from Strong Motion Records during the Normal-faulting Earthquakes in Hamadori, Fukushima Prefecture in 2011 // *J. Japan Association for Earthquake Engineering*. 2012. V. 12. DOI: 10.5610/jaee.12.7_1.
24. Satoh T. Short-period spectral level, F_{max} and attenuation of outerrise, intraslab and interplate earthquakes in the Tohoku district // *J. Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*. 2013. V. 78. DOI: 10.3130/aijs.78.1227.
25. Satoh T. Strong Motion Simulation of the 1987 Chiba-ken-

- toho-oki Earthquake (MJ 6.7) Using Stochastic Green's Function Generation Method Empirically Considering Surface Waves and Scattering Waves // J. JAEE. 2015. V. 15. P. 7_34–7_48. DOI: 10.5610/jaee.15.7_34.
26. Satoh T. Stochastic Green's functions considering surface waves and scattering waves using strong motion records of moderate-sized intraplate earthquakes along the Sagami trough // J. of Japan Association for Earthquake Engineering. 2015. V. 15, N. 1. P. 116–135. (in Japanese with English abstract).
 27. Satoh T. Broadband source model and strong motions of the 1855 Ansei-Edo earthquake estimated by the empirical green's function method. August 2016. Conference: 5th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion At: Taipei, Taiwan Volume: 104A.
 28. Satoh T., Okazaki A. Relation Between Stress Drops and Depths of Strong Motion Generation Areas Based on Previous Broadband Source Models for Crustal Earthquakes in Japan. In Earthquakes, Tsunamis and Nuclear Risks, Prediction and Assessment beyond the Fukushima Accident, Part II; Kamae K., Ed.; OAPEN Library: Hague, The Netherlands. 2016. P. 77–85.
 29. Satoh T. Broadband source characteristics of the 2016 Kumamoto earthquake estimated from strong motion records // J. Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ). 2017. V. 82. P. 1707–1717. DOI: 10.3130/aijs.82.1707.
 30. Satoh T. Rupture direction and short-period spectral level of moderate-sized intraslab and interplate earthquakes off the coast of Fukushima prefecture, Japan // Japan architectural review. 2023. V. 6. DOI: 10.1002/2475-8876.12340.
 31. Satoh T. Broadband Source Model of the 2023 Mw 7.8 Türkiye Earthquake from Strong-Motion Records by Isochrone Backprojection and Empirical Green's Function Method // Seismological Research Letters. 2023. V. 5. P. 584–595. DOI: 10.1785/0220230268
 32. Seabold S., Perktold J. Statsmodels: Econometric and Statistical Modeling with Python. Proceedings of the 9th Python in Science Conference. 2010.
 33. Somerville P., Irikura K., Graves R., Sawada S., Wald D., Iwasaki Y., Kagawa T., Smith N., Kowada A. Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion // Seismol. Res. Lett. 1999. V. 70. P. 59–80. DOI:10.1785/gssrl.70.1.59.
 34. Tajima R., Matsumoto Y., Si H., Irikura K. Comparative Study on Scaling Relations of Source Parameters for Great Earthquakes in Inland Crusts and on Subducting Plate-Boundaries. Zisin // J. Seismological Society of Japan. 2nd ser. 2013. V. 66. P. 31–45. DOI: 10.4294/zisin.66.31.
 35. Tohdo M., Arai K., Miyakoshi J., Sato T., Fujiwara H., Morikawa N. A proposal of the scaling relation for the short-period level associated with the three-stage model of inland crustal earthquakes // J. Japan Association for Earthquake Engineering. 2023. V. 23. P. 6_1-6_18. DOI: 10.5610/jaee.23.6_1.

Рекомендована к печати В.Г. Быковым

после доработки 18.06.2025 г.

принята к печати 17.09.2025 г.

EMPIRICAL RELATIONSHIP BETWEEN SOURCE-RELATED HIGH-FREQUENCY ACCELERATION SPECTRAL LEVEL, MOMENT MAGNITUDE AND TECTONIC EARTHQUAKES

A.V. Konovalov, Yu.A. Stepnova

Far East Geological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;

e-mail: stepnova@fegi.ru

Strong ground motion prediction is the primary task for the scientific community. Recent approaches to the seismic hazard assessment and simulation of seismic records are based on a multiple asperity earthquake source model. Fragmentary asperities are sub-sources of high-frequency seismic radiation. The key parameter associated with high-frequency sub-sources is an acceleration source spectrum and its high-frequency level. In this paper, parametrization of the high-frequency acceleration spectral level includes moment magnitude, focal depth, and additional predictors in the form of categorical variables that define the seismotectonic type of an earthquake, its focal mechanism and regional features. The obtained results allow ranking the seismic hazard level for different geodynamic settings in Russia.

Key words: earthquake, focal mechanism, stress drop, asperity, Fourier spectrum, tectonics.