

УДК 550.34

## КЛАСС ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО КОДЕ

© 2020 г. Ю. В. Шевченко<sup>а</sup>, \*, В. В. Яковенко<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Камчатский филиал ФИЦ “Единая Геофизическая Служба РАН”,  
бульвар Пийна, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

\*e-mail: klb@emsd.ru

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

После доработки 13.06.2019 г.

Принята к публикации 26.12.2019 г.

Описывается способ расчета энергетического класса землетрясений для Камчатского региона по записям коды в полосе частот 0.8–1.8 Гц. Метод основан на полученной эмпирически корреляционной связи уровня коды и класса землетрясения по Федотову. Уровень коды оценивается как средняя мощность для скорости смещения грунта на интервале 30 с. В Камчатском регионе выделено пять сейсмофокальных зон, для которых получены выражения, используемые при пересчете уровня коды в класс землетрясения.

**Ключевые слова:** класс землетрясения, кода.

**DOI:** 10.31857/S0203030620020078

### ВВЕДЕНИЕ

Сейсмическая энергия очага является одной из главных характеристик землетрясения. Энергетический класс определяется на основе оценки энергии упругих волн. Для энергетической классификации землетрясений Камчатки, как правило, используется региональная шкала  $K_{SI.2}^{Ф68}$  (далее  $K_S$ ) [Федотов, 1972]. Методика оценки класса землетрясения основана на измерении двух параметров сейсмического сигнала: отношения максимального значения амплитуды смещения грунта к видимому периоду колебаний ( $A/T$ ) и разности вступлений волн  $S$  и  $P$ . Значение  $A/T$  и соответствующие оценки энергетического класса существенно зависят от грунтовых условий в месте расположения сейсмической станции. Поэтому для учета особенностей грунта вводятся станционные поправки класса [Федотов, 1972; Лемзиков, Гусев, 1989; Шевченко, Яковенко, 2018].

Оценка класса землетрясения при использовании участков с записью регулярных волн существенно зависит от диаграммы направленности излучения очага, глубины и расстояния от эпицентра землетрясения до станции (учитывается при расчете по номограмме [Федотов, 1972]), особенностей распространения волны. Все это вносит дополнительный, и часто значительный разброс в оценках энергетического класса по записям разных станций. К этим обстоятельствам слабо чувствительна кода землетрясения [Раутиан и др., 1981]. Сейсмическая кода — хвостовая часть записи землетрясения, где регулярные вол-

ны практически отсутствуют, и наблюдается колебательный процесс, связанный со случайным рассеянием сейсмических волн на неоднородностях коры. Такими неоднородностями могут быть флюктуации скорости распространения волн и плотности среды, трещины и разрывы в среде, рельеф поверхности, рельеф внутренних границ раздела слоев.

Фундаментальным свойством коды является стабильность огибающей для волновой формы коды землетрясения (для данного частотного интервала и в пределах региона с примерно одинаковыми свойствами рассеяния и поглощения волн). То есть форма огибающей коды оказывается независимой от энергетического класса землетрясения, локализации источника (для землетрясений в пределах литосферы) и станции, а уровень огибающей в основном зависит от энергии землетрясения и локальных грунтовых условий в месте расположения станции (до проявления эффекта насыщения энергетической шкалы класса) [Раутиан и др., 1981]. Идея использования коды для энергетической классификации землетрясений является традиционной и с нее началось изучение коды [Маламуд, 1964; Нерсесов и др., 1975; Закиров и др., 1978; Раутиан и др., 1981; Лемзиков, Гусев, 1989]. Энергетический класс можно определять по уровню коды, если прямые волны и кода относятся к одному частотному диапазону. Найти соотношение между оценкой уровня коды и классом  $K_S$  — основная задача этой работы.

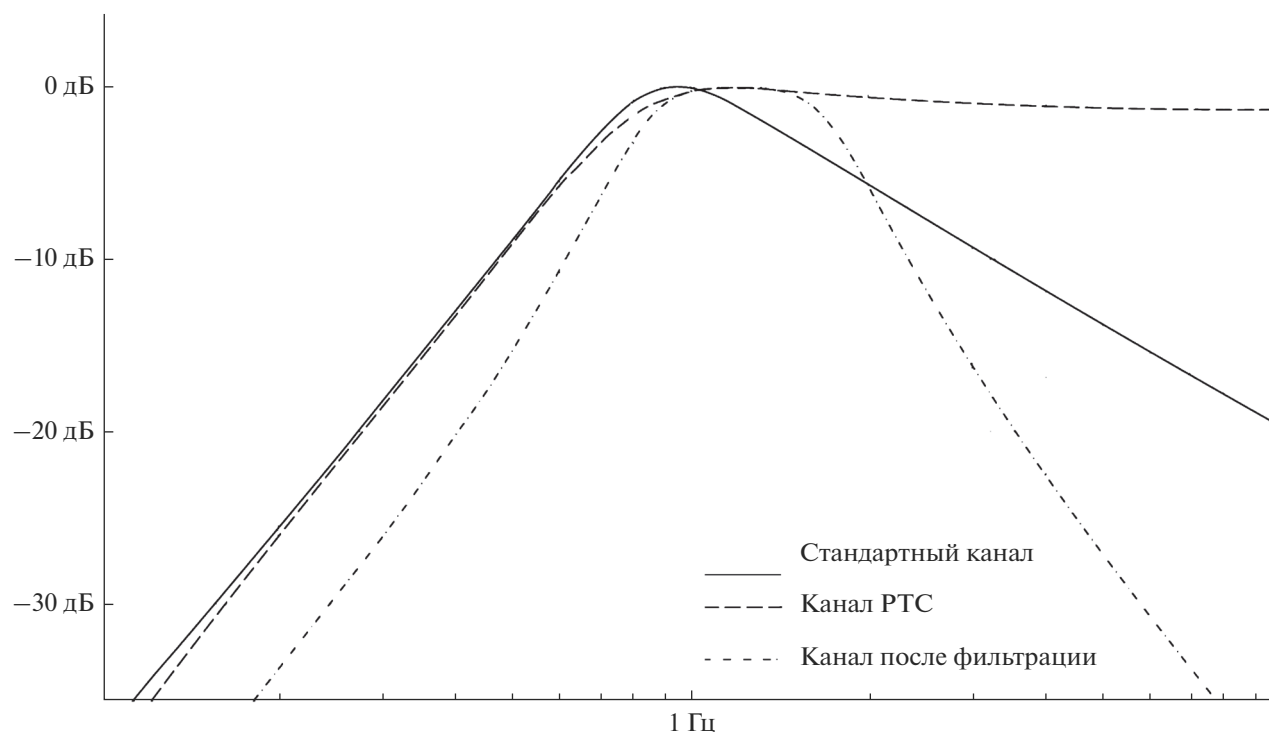


Рис. 1. Нормированные АЧХ каналов для скорости смещения грунта.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА КЛАССА ПО КОДЕ НА ОСНОВЕ ЗАПИСЕЙ СТАНЦИЙ “ПЕТРОПАВЛОВСК” ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ИЗ АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА

При разработке шкалы классов  $K_S$  использованы записи сейсмографов с периодом маятника 1.2 с (стандартный на региональных станциях канал) [Федотов, 1972]. Нормированная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) стандартного канала для скорости грунта показана на рис. 1.

На 37 действующих радиотелеметрических станциях (РТС) Камчатки установлены сейсмометры с таким же периодом. Нормированная АЧХ для канала РТС показана на рис. 1. При текущей обработке землетрясений, определение класса события по записи широкополосных цифровых каналов выполняется после эмуляции записи стандартного канала. В соответствии с частотным диапазоном сейсмических волн, для которых получена шкала классов  $K_{Sl.2}^{\Phi 68}$ , для расчета класса по коду выбрана полоса частот:  $f_l = 0.8$  Гц,  $f_h = 1.8$  Гц. Нормированная АЧХ канала после фильтрации (фильтр Баттерворта 2 порядка) показана на рис. 1. Важно отметить, что выбранная частота среза  $f_h$  позволяет снизить влияние высокочастотных бытовых, промыш-

ленных и ветровых помех, что позволило выполнять обработку сравнительно слабых событий.

Введем обозначения:  $T_0$  — время начала землетрясения;  $T_p$  и  $T_c$  — момент прихода волны  $P$  и момент, принятый за начало коды;  $t_p = T_p - T_0$ ,  $t_c = T_c - T_0$ . Естественным критерием начала коды является выход огибающей сейсмической записи на асимптотическую форму, характерную для заданного региона, при этом в асимптотической части форма и уровни огибающих коды примерно одинаковы на всех трех компонентах (по крайней мере, на горизонтальных), для станций, лежащих в разных направлениях от эпицентра [Раутиан и др., 1981]. Время  $t_c$ , с которого огибающая сейсмического сигнала переходит в асимптоту, зависит от частотного диапазона канала. Для канала с полосой пропускания  $f_l = 0.8$  Гц,  $f_h = 1.8$  Гц получена эмпирическая оценка связи времен  $t_p$  и  $t_c$  [Шевченко, Яковенко, 2018]:

$$t_c(t_p) = -0.00545t_p^2 + 3.02t_p + 20. \quad (1)$$

Уровень коды оценивался по интегралу от квадрата скорости грунта для участка записи длительностью 30 с, т.е., по существу, мощности сейсмического сигнала в полосе 0.8–1.8 Гц. Использование интегральной характеристики позволяет

также учесть влияние фонового шума микросейсм (вычитанием соответствующей мощности) на оценку уровня коды, вклад которого иногда достигал трети от суммарной мощности.

При расчете оценок уровня коды и класса землетрясения использованы записи велосиметра STS-1 и акселерометра CMG-5T, полученные на станции “Петропавловск” (РЕТ). В основании постаментов сейсмической станции РЕТ лежит скальный грунт, сложенный кремнистыми сланцами с  $\rho \approx 3 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ,  $v_p \approx 2500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Скорость получена методом сейсмического каротажа. Плотность  $\rho$  и скорость  $v_p$  взяты из паспорта на станцию РЕТ.

Для обработки данных применялась программа “DIMAS” [Дрознин, Дрознина, 2010]. Всего в обработке использованы записи 71 землетрясения 10–14 класса за 2009–2016 г. На участках записей, выбранных для анализа, присутствует только сигнал выбранного события и фоновый шум. Не использовались записи в случае наложения землетрясений. На рис. 2 показана область Авачинского залива, из которой выбирались землетрясения.

На уровень сейсмического сигнала оказывают влияние грунтовые и локальные геологические особенности, наличие резонирующего слоя, рельеф поверхности, колебания стоящих поблизости крупных сооружений и мачт. Вертикальная компонента сейсмического сигнала менее чувствительна к этим факторам, чем горизонтальные компоненты. Поэтому уровень коды оценивался по записи вертикальной компоненты смещения грунта. Сейсмограммы корректировались на “0” (по шуму перед вступлением волны  $P$ ), фильтровались (фильтр Баттерворта, 2 порядка, полоса 0.8–1.8 Гц), выполнялась эмуляция скорости смещения грунта (восстановление “истинного” движения грунта в выбранной полосе частот).

Обработанные таким образом сейсмограммы использовались для расчета уровня сейсмического сигнала на участке с записью коды и на участке с записью шума микросейсм. Максимальное значение времени пробега волны  $P$  до станции РЕТ для выбранной группы событий  $t_p = 31$  с, что, в соответствии с выражением (1), дает  $t_c = 109$  с. Оценка уровня коды рассчитывалась для  $t_c = 120$  с, т.е. выбран интервал  $t_c$  немного больше минимально допустимого для группы событий. Участки с записью фонового шума микросейсм длительностью 30 с выбирались непосредственно перед вступлением волны  $P$ .

На рис. 3 представлен график массива (71 значение) исходных данных ( $K_s, \lg(S_{120})$ ) и кривая полиномиальной аппроксимации этого графика. Здесь  $K_s$  – класс землетрясения по записи станции РЕТ,  $S_{120}$  – оценка уровня коды при  $t_c = 120$  с. Коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.7753$ .

Выражение кривой аппроксимации имеет вид:

$$K_c = 0.1417 \lg(S_{120})^2 + 3.664 \lg(S_{120}) + 34.19. \quad (2)$$

Здесь  $K_c$  – оценка класса по коде. Для набора данных, использованных при получении этого выражения, рассчитаны значения среднего смещения  $\langle K_s - K_c \rangle \approx 0.001$  и разброс СКО ( $\langle K_s - K_c \rangle \approx 0.39$ ). Соотношение (2) справедливо при использовании участка коды с началом на 120 с от  $T_0$ . Если оценка интеграла от квадрата скорости рассчитана для участка коды с другим временем  $t_c$ , требуется калибровочная кривая, позволяющая перейти от значения  $\lg(S)$  к  $\lg(S_{120})$ .

## ПОСТРОЕНИЕ КАЛИБРОВОЧНОЙ КРИВОЙ ДЛЯ УРОВНЯ КОДЫ

1. Записи событий разбиваются на 3 группы по времени  $t_p$ : первая (20 событий) для  $t_p = 15$ –24 с; вторая (17 событий) для  $t_p = 25$ –28 с; третья (14 событий) для  $t_p = 29$ –31 с. Разбиение на группы позволяет построить калибровочную кривую в более широком диапазоне времен  $t_c$ .

2. После эмуляции скорости смещения грунта, записи землетрясений фильтруются в полосе пропускания  $f_l = 0.8$  Гц,  $f_h = 1.8$  Гц, возводятся в квадрат и, с целью нормировки уровня коды на записях событий разных классов, умножаются на  $1/S_{120}$ .

3. Нормированные квадраты записей для каждой группы выравниваются по моменту  $T_0$  и усредняются.

4. Усредненные по группе записи землетрясений используются для расчета  $\langle S_{ш} \rangle$  – интеграла от квадрата шума перед вступлением волн  $P$ , и  $\langle S_{(ш+к)} \rangle$  – интеграла от квадрата коды. Значения  $\langle S_{(ш+к)} \rangle$  рассчитывались с шагом 10 с в диапазоне времен  $t_c = 80$ –210 с. Верхняя граница  $t_c$  зависит от уровня шума  $\langle S_{ш} \rangle$ , который должен быть ниже значения  $\langle S_{(ш+к)} \rangle$  не менее чем в три раза.

5. Рассчитывается  $\langle S \rangle = \langle S_{(ш+к)} \rangle - \langle S_{ш} \rangle$ .

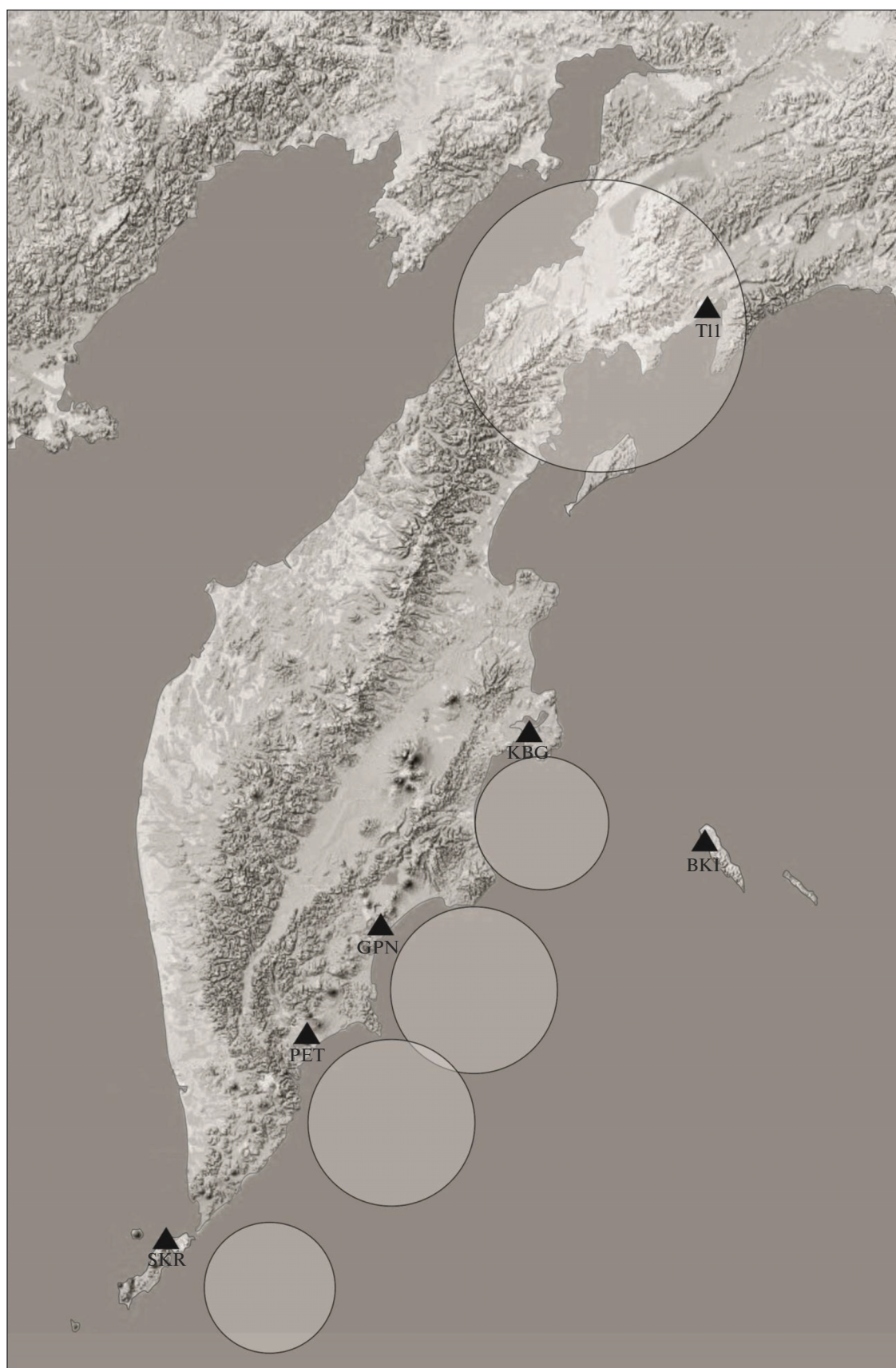


Рис. 2. Участки фокальной зоны, из которых выбирались события, и соответствующие этим зонам опорные станции.

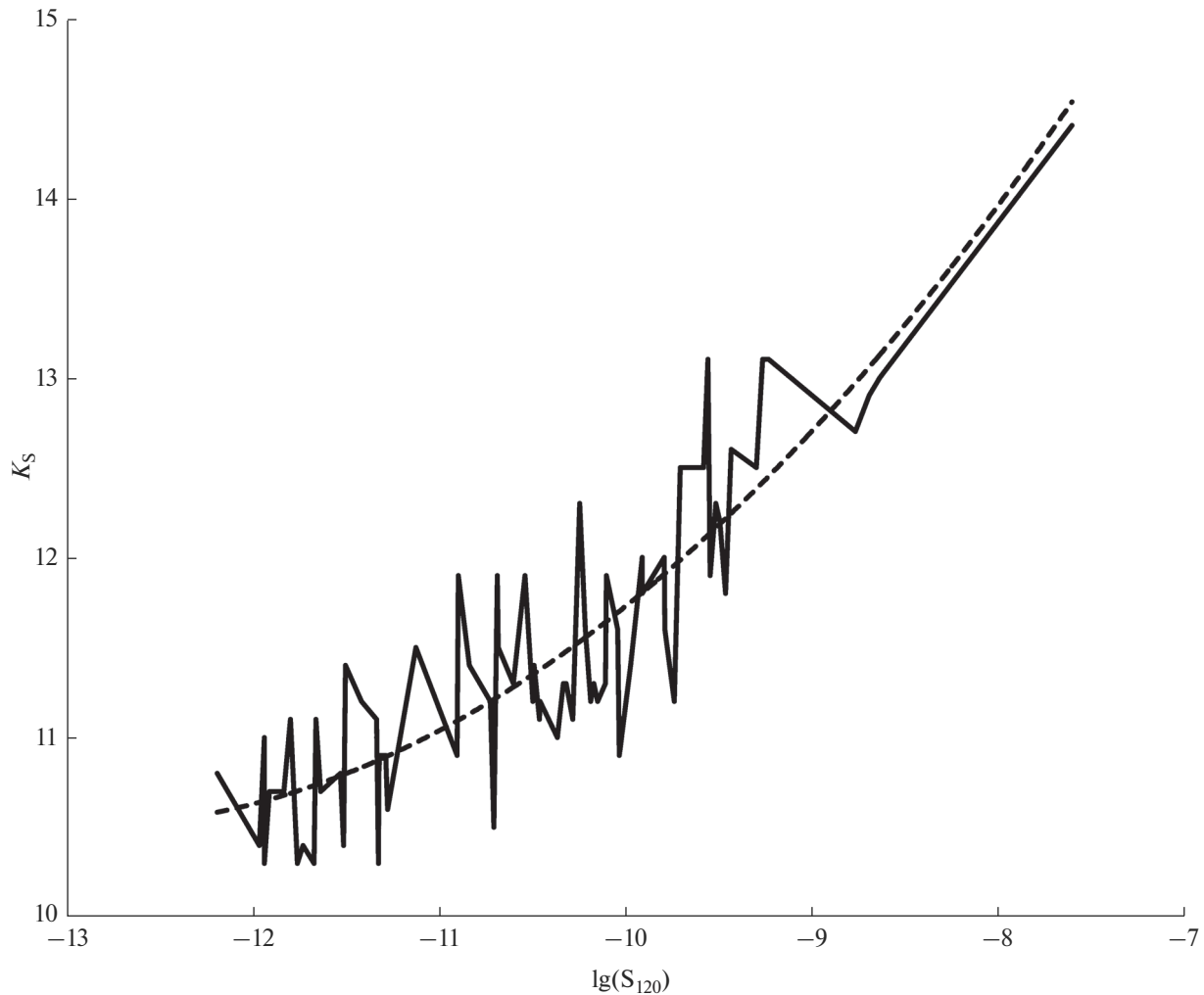


Рис. 3. Оценка связи уровня коды и класса землетрясения для станции РЕТ при  $t_c = 120$  с.

6. Для каждого  $t_c$  рассчитывается усредненная по группам оценка  $\langle\langle S \rangle\rangle$ .

При построении калибровочной кривой использованы записи 51 землетрясения из Авачинского залива, полученные на станции РЕТ. Выражение для полиномиальной аппроксимации массива  $(\lg(\langle\langle S \rangle\rangle), t_c)$  из 14 точек имеет вид:

$$\lg(S) = 4.232 \times 10^{-5} t_c^2 - 0.02964 t_c - 9.028. \quad (3)$$

Соответствующая выражению (3) кривая аппроксимации представлена на рис. 4. Коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.9996$ .

Используя выражение (3), можно рассчитать поправку для перехода от  $\lg(S)$  для некоторого  $t_c$  к  $\lg(S_{120})$ :

$$\Delta \lg(S) = \lg(S_{120}) - \lg(S) = -4.232 \times 10^{-5} t_c^2 + 0.02964 t_c - 2.946. \quad (4)$$

Расчет оценки класса  $K_c$  по коду землетрясения для некоторой станции можно разбить на следующие этапы:

1. Исходная запись вертикальной компоненты смещения грунта фильтруется (фильтр Баттерворта, 2 порядка, полоса 0.8–1.8 Гц). При необходимости эмулируется скорость смещения грунта. Затем возводится в квадрат;

2. На возведенной в квадрат записи выделяются два участка длительностью 30 с. Участок коды, начало которого отстоит от момента  $T_0$  на время не менее  $t_c$  (см. (1)), и участок микросейсм непосредственно перед вступлением  $P$  волны;

3. Для выделенных участков рассчитываются интеграл от квадрата записи коды  $S_{(ш+к)}$  и шума

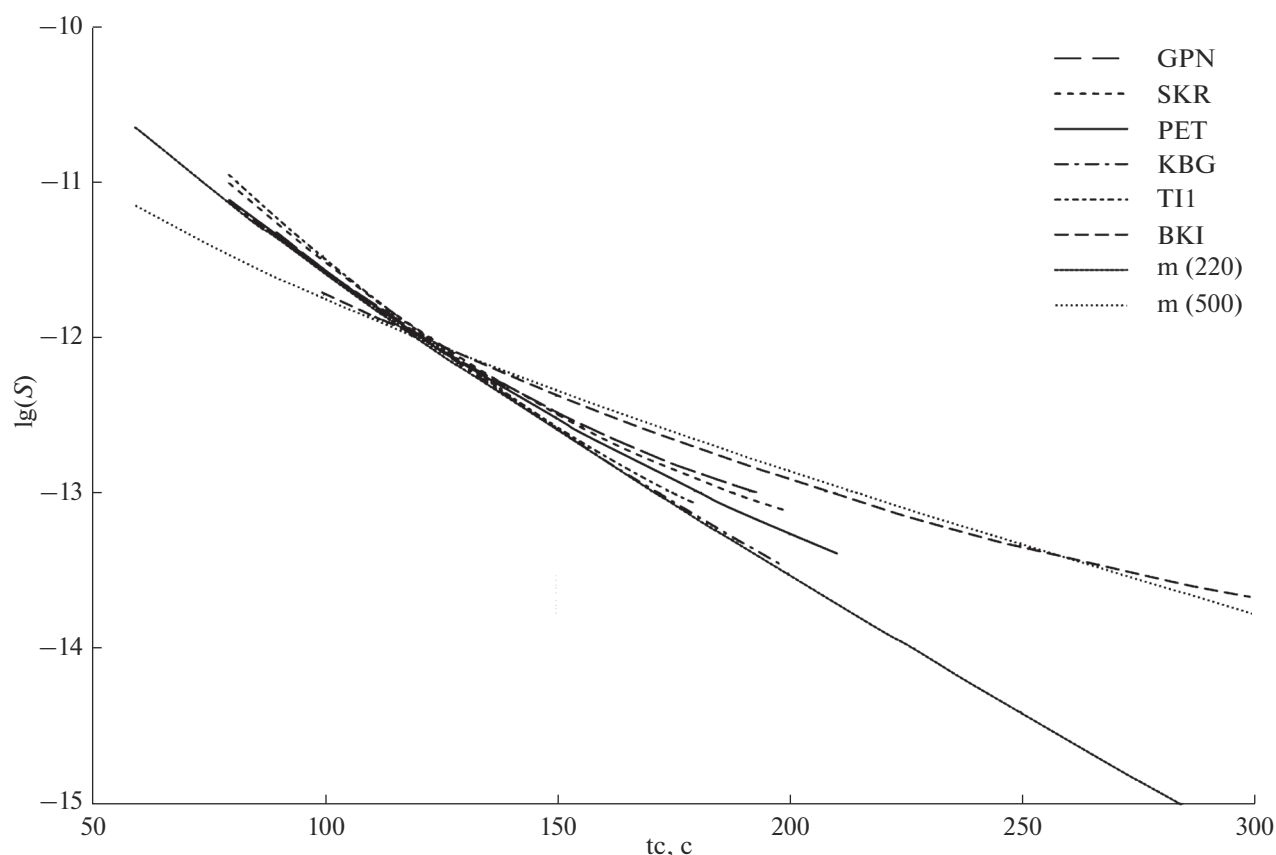


Рис. 4. Калибровочные кривые для пяти участков сейсмофокальной зоны, позволяющие перейти от значения  $\lg(S)$  к  $\lg(S_{120})$ .

$S_{ш}$ , затем  $S = S_{(ш+к)} - S_{ш}$ . Уровень  $S_{(ш+к)}$  на выделенном участке должен не менее чем в 3 раза превышать уровень микросейсм  $S_{ш}$ ;

4. Расчет значения  $\lg(S_{120}) = \lg(S) + \Delta \lg(S)$ , (см. (4));

5. Приведение оценки уровня коды  $\lg(S_{120})$  к уровню на станции РЕТ:  $\lg(S_{120})_{\text{pet}} = \lg(S_{120}) + \Delta K_v$ ,  $\Delta K_v$  — станционная поправка класса для вертикальной компоненты относительно станции РЕТ [Шевченко, и др., 2018];

6. Расчет класса землетрясения по коде (см. (2)).

#### ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ СОБЫТИЙ ИЗ АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА

Тестирование методики расчета класса землетрясений по коде выполнено на примере 39 землетрясений 10–13 классов из Авачинского залива за 2014–2017 гг. (выборка событий не совпадает с землетрясениями, использованными при расчете выражения (2)). Оценивалось смещение и среднеквадратичное отклонение оценок классов зем-

летрясений, полученных по записям станций, расположенных в г. Петропавловске и его окрестностях, от оценки по данным станции РЕТ. В табл. 1 представлены результаты сравнения.

Из представленных в таблице данных следует, что абсолютная величина среднего расхождения в оценках класса на станции РЕТ и оценках на других станциях составляет около 0.03. Среднее расхождение в оценках класса  $K_c$  для станции РЕТ и класса из регионального каталога  $K_s$  для землетрясений, использованных при тестировании, следующее:  $\langle K_s - K_c \rangle = 0.37$ ,  $\text{СКО}(\langle K_s - K_c \rangle) = 0.45$ .

#### ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ СОБЫТИЙ ИЗ КАМЧАТСКОГО ЗАЛИВА, ЮГА КАМЧАТКИ, КРОНОЦКОГО ЗАЛИВА И СЕВЕРА КАМЧАТКИ

Похожая схема расчета класса землетрясений по коде была использована при обработке записей сейсмических событий из других участков сейсмофокальной зоны: Камчатского залива, юга Камчатки, Кроноцкого залива и севера Камчатки (см. рис. 2). Как отмечалось выше, уровень коды

**Таблица 1.** Сравнение оценок классов землетрясений из Авачинского залива

| Станция | $n$ | $\Delta K_c$ | СКО( $\Delta K_c$ ) | Станция | $n$ | $\Delta K_c$ | СКО( $\Delta K_c$ ) | Станция | $n$ | $\Delta K_c$ | СКО( $\Delta K_c$ ) |
|---------|-----|--------------|---------------------|---------|-----|--------------|---------------------|---------|-----|--------------|---------------------|
| ADM     | 33  | 0.00         | 0.03                | GPN     | 29  | -0.01        | 0.15                | PTG     | 22  | -0.03        | 0.10                |
| AER     | 38  | 0.00         | 0.15                | IVS     | 37  | -0.04        | 0.14                | RIB     | 34  | -0.02        | 0.10                |
| AVH     | 37  | -0.08        | 0.18                | KDT     | 28  | 0.05         | 0.13                | RUS     | 30  | -0.04        | 0.11                |
| DAL     | 26  | -0.01        | 0.11                | KRM     | 33  | -0.04        | 0.13                | SCH     | 37  | -0.01        | 0.08                |
| DCH     | 31  | -0.04        | 0.12                | MPPA    | 24  | 0.04         | 0.15                | SPN     | 32  | 0.00         | 0.13                |
| GK001   | 27  | -0.02        | 0.09                | MSN     | 37  | -0.06        | 0.17                | SPZ     | 21  | -0.02        | 0.11                |
| GK002   | 25  | 0.01         | 0.08                | NCHK    | 15  | -0.04        | 0.09                | VIL     | 35  | -0.04        | 0.10                |
| GK003   | 29  | -0.07        | 0.20                | NIC     | 33  | -0.07        | 0.14                | VST     | 36  | -0.01        | 0.07                |
| GK004   | 24  | -0.03        | 0.08                | NII     | 37  | -0.03        | 0.16                |         |     |              |                     |
| GK005   | 19  | -0.03        | 0.11                | NLC     | 18  | 0.02         | 0.10                |         |     |              |                     |

Примечание.  $\Delta K_c = \langle K_c - K_{\text{срет}} \rangle$  – среднее смещение оценки класса по коду для группы станций от класса на станции РЕТ; СКО( $\Delta K_c$ ) – среднее квадратичное отклонение для ( $K_c - K_{\text{срет}}$ );  $n$  – количество землетрясений, записи которых были использованы.

в основном зависит от энергии землетрясения и локальных грунтовых условий. Поэтому, при использовании одинаковых методик для расчета классов  $K_s$  и  $K_c$ , оправдано использование выражения (2), полученного для зоны Авачинского залива с учетом станционных поправок относительно станции РЕТ [Шевченко, Яковенко, 2018]. Однако свойства рассеяния и поглощения сейсмических волн в этих районах могут быть другими, поэтому выражения для калибровочной кривой требует уточнения.

При расчете калибровочной кривой для Кроноцкого залива использованы записи 14 землетрясений. Аппроксимация массива значений ( $\lg(\langle\langle S \rangle\rangle), t_c$ ) получена с коэффициентом достоверности  $R^2 = 0.9992$ . Соответствующее выражение для поправки имеет вид:

$$\Delta \lg(S) = -6.831 \times 10^{-5} t_c^2 + 0.03545 t_c - 3.270. \quad (5)$$

При расчете полинома использовано 11 значений  $t_c$  с шагом 10 с.

Для Камчатского залива (20 событий, коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.9988$ ) получено выражение:

$$\Delta \lg(S) = -2.032 \times 10^{-5} t_c^2 + 0.02525 t_c - 2.738. \quad (6)$$

При расчете полинома использовано 13 значений  $t_c$  с шагом 10 с.

Для юга Камчатки (28 событий, коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.9990$ ) получено выражение:

$$\Delta \lg(S) = -7.233 \times 10^{-5} t_c^2 + 0.03775 t_c - 3.489. \quad (7)$$

При расчете полинома использовано 13 значений  $t_c$  с шагом 10 с.

Для севера Камчатки (18 событий, коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.9989$ ) получено выражение:

$$\Delta \lg(S) = -6.408 \times 10^{-5} t_c^2 + 0.03773 t_c - 3.605. \quad (8)$$

При расчете полинома использовано 11 значений  $t_c$  с шагом 10 с.

Для станции ВКИ и землетрясений из Камчатского залива (25 событий, коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.9949$ ) получено выражение:

$$\Delta \lg(S) = -2.173 \times 10^{-5} t_c^2 + 0.01846 t_c - 1.903. \quad (9)$$

При расчете полинома использовано 21 значение  $t_c$  с шагом 10 с.

Таблица 2. Сравнение оценок классов

| Станция | Опорная станция | $n$ | $\Delta K_c$ | СКО( $\Delta K_c$ ) | Станция | Опорная станция | $n$ | $\Delta K_c$ | СКО( $\Delta K_c$ ) |
|---------|-----------------|-----|--------------|---------------------|---------|-----------------|-----|--------------|---------------------|
| SPN     | GPN             | 20  | 0.06         | 0.12                | UK1     | KBG             | 19  | -0.03        | 0.06                |
| TUMD    | GPN             | 13  | -0.03        | 0.09                | UK2     | KBG             | 15  | -0.05        | 0.08                |
| BZG     | KBG             | 18  | -0.02        | 0.08                | UK3     | KBG             | 6   | -0.03        | 0.06                |
| ESO     | KBG             | 14  | -0.02        | 0.07                | UK4     | KBG             | 18  | 0.01         | 0.05                |
| KIR     | KBG             | 5   | -0.07        | 0.07                | KDT     | SKR             | 28  | 0.05         | 0.06                |
| KLY     | KBG             | 15  | -0.07        | 0.12                | PAU     | SKR             | 18  | 0.07         | 0.09                |
| KOZ     | KBG             | 18  | 0.01         | 0.13                | SK2     | SKR             | 17  | 0.01         | 0.04                |
| TIGL    | KBG             | 11  | 0.07         | 0.09                | SK3     | SKR             | 1   | 0.07         |                     |
| TUMD    | KBG             | 12  | -0.05        | 0.06                | KMSK    | TL1             | 16  | 0.03         | 0.09                |
| CIR     | KBG             | 9   | 0.01         | 0.15                | OSS     | TL1             | 16  | -0.04        | 0.06                |
| LGN     | KBG             | 1   | 0.06         |                     | PAL     | TL1             | 14  | -0.01        | 0.08                |

Примечание. Обозначения см. табл. 1.

Соответствующие этим выражениям калибровочные кривые показаны на рис. 4. Коэффициент достоверности аппроксимации калибровочных кривых близок к единице, поэтому расхождение кривых, скорее всего, отражает фактическое различие в свойствах среды в разных зонах.

Примем за модель, описывающей изменение спектра мощности коды со временем, следующее выражение [Раутиан и др., 1981]:

$$P(f, t) \sim t^{-\nu} \exp(-2\pi f t / Q).$$

Здесь  $f$  — частота,  $t$  — время,  $\nu$  — показатель геометрического расхождения ( $\nu = 1-2$ ),  $Q$  — добротность среды. При расчете моделей использованы значения  $\nu = 1.5$  (среднее для показателей объемных —  $\nu = 2$  и поверхностных —  $\nu = 1$  волн),  $f = (f_l f_h)^{0.5} = 1.2$  Гц. На рис. 4 показаны кривые, соответствующие моделям с  $Q = 220$  и  $Q = 500$ . Исходя из этих моделей, добротность коры в Камчатском заливе близка к 220, в районе станции ВК1  $Q \approx 500$  и почти не меняется с ростом  $t_c$ , а значит, в некоторых пределах, с глубиной. Полученные оценки добротности несколько выше, чем в работе [Абубакиров, 2005], где приводится выражение  $Q \approx 200 f^{0.3}$ , и для  $f = 1.2$  Гц,  $Q \approx 210$ . Изменение наклона калибровочных кривых с ростом  $t_c$  соответствует увеличению добротности с глубиной, поскольку с ростом  $t_c$  увеличивается глубина области рассеяния сейсмических волн, в

которую попадает погружающийся под Камчатку слэб.

Тестирование расчета класса землетрясений по коде для четырех участков фокальной зоны выполнено на следующих выборках (указана опорная станция зоны): GPN — 20 событий за 2015–2016 гг.; KBG — 20 событий за 2015–2017 гг.; SKR — 30 событий за 2015–2017 гг.; TL1 — 16 событий за 2013–2017 гг. Результаты тестирования представлены в табл. 2. В таблице представлены смещения и среднеквадратичные отклонения оценок классов землетрясений по коде для сейсмических станций близких к соответствующим опорным станциям GPN, KBG, SKR, TL1 (записи опорных станций использовались при получении калибровочных кривых).

Из представленных в табл. 2 данных следует, что абсолютная величина среднего отклонения оценки  $\Delta K_c$  составляет около 0.04. Расхождение в оценках класса  $K_c$  для опорных станций и класса из регионального каталога  $K_s$  следующее:

$$\text{для станции GPN } \langle K_s - K_c \rangle = 0.25;$$

$$\text{СКО}(\langle K_s - K_c \rangle) = 0.52;$$

$$\text{для станции KBG } \langle K_s - K_c \rangle = 0.19,$$

$$\text{СКО}(\langle K_s - K_c \rangle) = 0.48;$$

$$\text{для станции SKR } \langle K_s - K_c \rangle = 0.39,$$

$$\text{СКО}(\langle K_s - K_c \rangle) = 0.45;$$

$$\text{для станции TL1 } \langle K_s - K_c \rangle = -0.01,$$

$$\text{СКО}(\langle K_s - K_c \rangle) = 0.32.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ оценки энергетического класса  $K_{SI.2}^{Ф68}$  по уровню коды землетрясений. В Камчатском регионе выделено пять сейсмофокальных зон: Авачинский залив, Камчатский залив, юг Камчатки, Кроноцкий залив и север Камчатки. Для каждой из этих зон получено выражение калибровочной кривой для пересчета уровня коды в энергетический класс землетрясения. Оценка класса по коде для событий из этих зон выполняется по записям станций, относящихся своим расположением к этим зонам [Чебров и др., 2013].

Тестирование метода показало хорошее соответствие в оценках, полученных по данным разных станций: отклонение оценок по модулю не превышало 0.05. Следует отметить, что, как и любая магнитудная шкала для короткопериодных приборов, оценка класса по коде в соответствии с выражением (2) имеет свойство насыщения, поэтому применять эту методику для землетрясений с  $M > 7$  следует с осторожностью.

Разброс оценок класса по коде и класса из регионального каталога (среднеквадратичное отклонение) составил примерно 0.5, отклонение оценок по абсолютной величине не превышало 0.4. Объяснить причину такого расхождения в оценках класса по коде и класса из регионального каталога можно следующим образом. Прежде всего, оценки  $K_S$ , использованные при получении выражения (2), сделаны для опорной станции РЕТ с особой тщательностью. При получении оценок классов при стандартной обработке для регионального каталога берется среднее от оценок по всем станциям, на которых она имеется, причем для многих станций без учета станционных поправок. Поскольку почти все станции сети превышают класс землетрясения относительно станции РЕТ, средняя оценка всегда будет смещена. Разброс расхождения оценок также будет значителен, т.к. комбинации станций, данные которых использованы при получении оценок классов для регионального каталога, меняются. Иллюстрацией этого может служить относительно небольшое смещение среднего расхождения в оценках для северных станций. Расчет оценок класса для этого района обычно основан на данных станций Палана, Тиличики и Оссора, для которых станционная поправка сравнительно мала — 0.13, 0.67, 0.06 соответственно. При использовании станционных поправок в практике рутинной обработки расхождение между классом по коде и

классом из регионального каталога должно быть значительно меньше.

Следует отметить, что представленный метод оценки энергетического класса землетрясений проблематично использовать для слабых событий и событий с наложением записи. Поэтому этот способ надо рассматривать как дополнительный к применяемым в настоящее время методикам оценки энергетического класса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абубакиров И.Р. Оценка характеристик затухания поперечных волн в литосфере Камчатки по наблюдениям цифровой широкополосной станции “Петропавловск” // Физика Земли. 2005. № 10. С. 46–58.
- Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.
- Закиров М.С., Раутиан Т.Г., Халтурин В.И. Магнитудная классификация землетрясений Узбекистана по уровню хвостовой части сейсмограммы // Узбекский геол. журн. 1978. № 1. С. 65–69.
- Лемзиков В.К., Гусев А.А. Энергетическая классификация близких камчатских землетрясений по уровню кода-волн // Вулканология и сейсмология. 1989. № 4. С. 83–97.
- Маламуд Ф.С. О возможности классификации землетрясений по длительности колебаний // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 5. С. 728–732.
- Нерсесов И.Л., Копничев Ю.Ф., Востриков Г.А. Магнитудная калибровка землетрясений по кода-волнам на расстояниях до 3000 км. // Докл. АН СССР. 1975. Т. 222. № 1. С. 76–78.
- Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С и др. Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука, 1981. 142 с.
- Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.
- Шевченко Ю.В., Яковенко В.В. Расчет станционной поправки класса и сейсмической жесткости для станций Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2018. № 3. С. 70–80.

## Energy Classification of Earthquakes Based on Coda-waves Level

**Yu. V. Shevchenko<sup>1, \*</sup> and V. V. Yakovenko<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Kamchatka Branch of FIC "Unified Geophysical Service of RAS",  
Bul'var Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

*\*e-mail: klb@emsd.ru*

A method for calculating the energy class of earthquakes for the Kamchatka region is described using records of codes in the frequency band of 0.8–1.8 Hz. The method is based on the empirically obtained correlation between the level of the codes and the class of the Fedotov earthquake. The code level is estimated as the average power for the displacement rate of the soil over an interval of 30 seconds. In the Kamchatka region, there are five seismic focal zones, for which expressions are used, which are used to convert codes into the class of earthquake.

*Keywords:* energy class, coda waves.