

УДК 550.34.042.4

РЕГИОНАЛЬНАЯ ШКАЛА МАГНИТУД ПО ПОВЕРХНОСТНЫМ ВОЛНАМ ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ

© 2017 г. О. С. Чубарова^{1, *}, А. А. Гусев^{1, 2, **}

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

²Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский

*E-mail: ochubarova@emsd.ru

**E-mail: gusev@emsd.ru

Поступила в редакцию 04.06.2015 г.

Создана модернизированная шкала $M_s(20R)$ для магнитудной классификации землетрясений Дальнего Востока России по амплитудам поверхностных волн на региональных расстояниях. Шкала расширяет в сторону малых эпицентральных расстояний (0.7° – 20°) область применимости классической шкалы $M_s(20)$ по Гутенбергу. Магнитуда определяется по амплитуде сигнала, предварительно пропущенного через цифровой полосовой фильтр, выделяющий компоненты с периодами вблизи 20 с. Измеряется амплитуда либо для поверхностных волн, либо, на небольших расстояниях 0.7° – 3° , для неразделимой волновой группы поверхностных и поперечных волн. Наличие четкой спектральной привязки отличает шкалу $M_s(20R)$ от традиционной шкалы $M_s(BB)$ по Соловьеву–Ванеку. Такой подход позволил практически снять проблему заметных (до -0.5) региональных и станционных аномалий, присущих шкале $M_s(BB)$ в условиях Дальнего Востока. Отсутствие заметных станционных и региональных аномалий, а также жесткая спектральная привязка дают шкале $M_s(20R)$ существенные преимущества при ее использовании с целью оперативного принятия решения о подаче тревоги цунами для побережий Дальнего Востока России.

Ключевые слова: землетрясение, шкала магнитуд, поверхностные волны, Соловьев, Гутенберг, полосовой фильтр

DOI: 10.7868/S0002333716060028

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени создано много вариантов магнитудной классификации землетрясений. Каждая из них дает численную характеристику землетрясения в плане мощности его очага как излучателя упругих волн. Первая магнитудная шкала Рихтера 1935 г. была региональной; она была распространена на телесеismicкие расстояния Гутенбергом. Последний обнаружил высокую эффективность для этой цели максимальных амплитуд A группы поверхностных волн с периодами T около 20 с и построил на этой основе глобальную шкалу $M_s^{(Gut)}(20)$, пригодную в диапазоне эпицентральных расстояний 20° – 180° . И. Ванек и С.Л. Соловьев предложили использовать вместо A максимум отношения A/T , что позволило раздвинуть диапазон расстояний до 2° – 180° и, используя волны с меньшими периодами, – до 3 с, определять магнитуды для многих землетрясений умеренной силы на региональных расстояниях. Одновременно была обойдена та проблема, что массовый прибор советской сети – СК, при периоде маятника 10–12 с, не вполне пригоден для выделения и обмера волн с периодом около 20 с.

И. Ванек и С.Л. Соловьев несколько изменили калибровочную функцию Гутенберга, получив известную “Пражскую формулу” [Ванек и др., 1962]. Шкала Ванека–Соловьева, имеющая в современной символике обозначение $M_s(BB)$, является стандартом в мировой и российской сейсмологии [Bormann et al., 2002; 2007], она использовалась в СССР–России с момента ее создания. Однако ведущая сейсмическая служба NEIC (США) не приняла этот стандарт буквально. Следуя Гутенбергу [Gutenberg, 1945], она использует лишь амплитуды, максимальные в пределах заданного неширокого диапазона видимых периодов 18–22 с, причем лишь для расстояний более 20° . Для получения шкалы со столь четкой спектральной привязкой в области частот около 0.05 Гц (период около 20 с) используется факт дисперсии поверхностных волн. Затухание амплитуд с расстоянием NEIC принимает по “Пражской формуле”. Результат применения описанной процедуры получает международное обозначение $M_s(20)$. Шкалы $M_s(20)$ и $M_s(BB)$ взаимно согласуются. Отметим, что калибровочная функция Соловьева–Ванека была разработана для горизон-

тальных компонент, но ныне она считается универсальной и используется для вертикальных компонент (волн Релея).

Важное неудобство шкал $M_s^{(Gut)}(20)$ и $M_s(20)$ – невозможность их использования на малых эпицентральных расстояниях (менее 20°). Здесь эффекты дисперсии еще не проявились в достаточной мере, так что выделить цуг с периодами около 20 с затруднительно. При этом оценки магнитуды для малых расстояний принципиально необходимы, в особенности потому, что ее важнейшим практическим применением является применение для принятия решения о тревоге цунами; шкала $M_s(BB)$ справляется с этой задачей. Шкала $M_s(BB)$ – основная в российской сейсмической службе, использует максимальную видимую амплитуду поверхностных волн Релея на эпицентральных расстояниях от 2° . Шкала использует фактически наблюдаемый видимый период поверхностных волн, который на малых расстояниях 2° – 3° обычно составляет 3–5 с. С ростом расстояния видимый период достигает 10–20 с и более. На расстояниях более 20° магнитуды по шкалам $M_s(20)$ и $M_s(BB)$ обычно близки, что следует почти автоматически из близости методик. Обычное согласие оценок $M_s(BB)$ между близкими и удаленными станциями возникает по другому механизму – за счет эмпирического факта согласованности оценок по значениям отношений A/T при разных T , и неявно опирается на определенное типичное устройство очагового спектра землетрясения; однако нередки и случаи несогласованности за счет спектральных особенностей конкретного очага. Основные минусы шкалы $M_s(BB)$ следующие: 1) нежесткая спектральная привязка, что ведет к неудобствам для таких важных приложений, как оценка потенциала разрушительных волн цунами или анализ сильных движений грунта; 2) трудности аккуратного обмера видимого периода и снятия амплитуды на малых эпицентральных расстояниях, когда приходится использовать короткий широкополосный волновой цуг, который, к тому же, часто затруднительно отделить от группы поперечных волн; и 3) наличие существенных стационарных и региональных аномалий.

Проблема спектральной привязки существенна при использовании магнитудных данных с целью оперативного принятия решения о подаче тревоги цунами для побережий Дальнего Востока России. Для подачи тревоги цунами в принципе желательно использовать как можно более низкие частоты. С этой точки зрения, шкала $M_s(BB)$ сегодня явно далека от оптимальной, но следует понимать, что в доцифровую эпоху решение С.Л. Соловьева было здравым и адекватным. Проблему с обмером амплитуд весьма широкополосного сигнала и часто затруднительным глазо-

мерным подавлением высокочастотной “помехи” также следовало снять. Наконец, проблема региональных и стационарных аномалий шкалы $M_s(BB)$ является особо выраженной в условиях Дальнего Востока России, где эти аномалии достигают значения -0.5 [Соловьев, 1974]. Предпринимались попытки исправить ситуацию путем введения системы региональных и стационарных поправок, но это задача не получила четкого решения. В работе [Чебров и др., 2013] проанализировали временной ход невязки магнитуды $M_s(BB)$ по сейсмостанции Петропавловск относительно среднесетевой за период 1967–2007 гг. и показали, что она не только не мала, но к тому же существенно менялась вместе с изменением системы регистрации и методов обработки. Недостатки общепринятых шкал магнитуды по поверхностным волнам отмечались ранее [Evernden, 1971; Marshall, Basham, 1973; von Seggern, 1977; Panza et al., 1989; Herak, Herak, 1993; Rezapour, Pearce, 1998; Alewine III, 1972; Okal, 1989], причем предлагались различные варианты улучшенных калибровочных кривых.

Перечисленные проблемы вызвали необходимость создания новой региональной модификации шкалы M_s . Этой задаче посвящена настоящая работа. Ее идея – использовать цифровой фильтр для выделения полосы вблизи периода 20 с при малых расстояниях, где “естественное” выделение таких колебаний за счет дисперсии не имеет места. Новая модификация далее обозначается $M_s(20R)$. Аналогичный подход к созданию региональной магнитудной шкалы был применен в работе [Singh, Pacheco, 1994], где использован диапазон периодов 15–30 с.

Первый этап разработки шкалы $M_s(20R)$ отражен в публикации [Чубарова и др., 2010]. Данная статья отражает дальнейшие шаги развиваемого подхода и включает как главное новое достижение уточненный вариант калибровочных функций.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходного материала в работе использованы записи 433 землетрясений Северо-Западной части Тихоокеанского региона периода 1993–2009 гг. на 12 широкополосных цифровых сейсмических станциях (PET, YSS, MA2, YAK, KAM, ADK, TIXI, BILL, MDJ, INCN, ERM, MAJO), всего – 1659 трехкомпонентных записи каналов ВН. Цифровые записи землетрясений выбирались из архива IRIS DMC (<http://www.iris.edu/dMs/wilber.htm>) и из базы данных цунами КФ ГС РАН. Глубина очагов землетрясений – до 70 км. Отбирались только те землетрясения, для которых имелась оценка телесеismicической магнитуды $M_s(20)$ в каталоге NEIC (<http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html>). Диапазон магнитуд использованных землетрясений

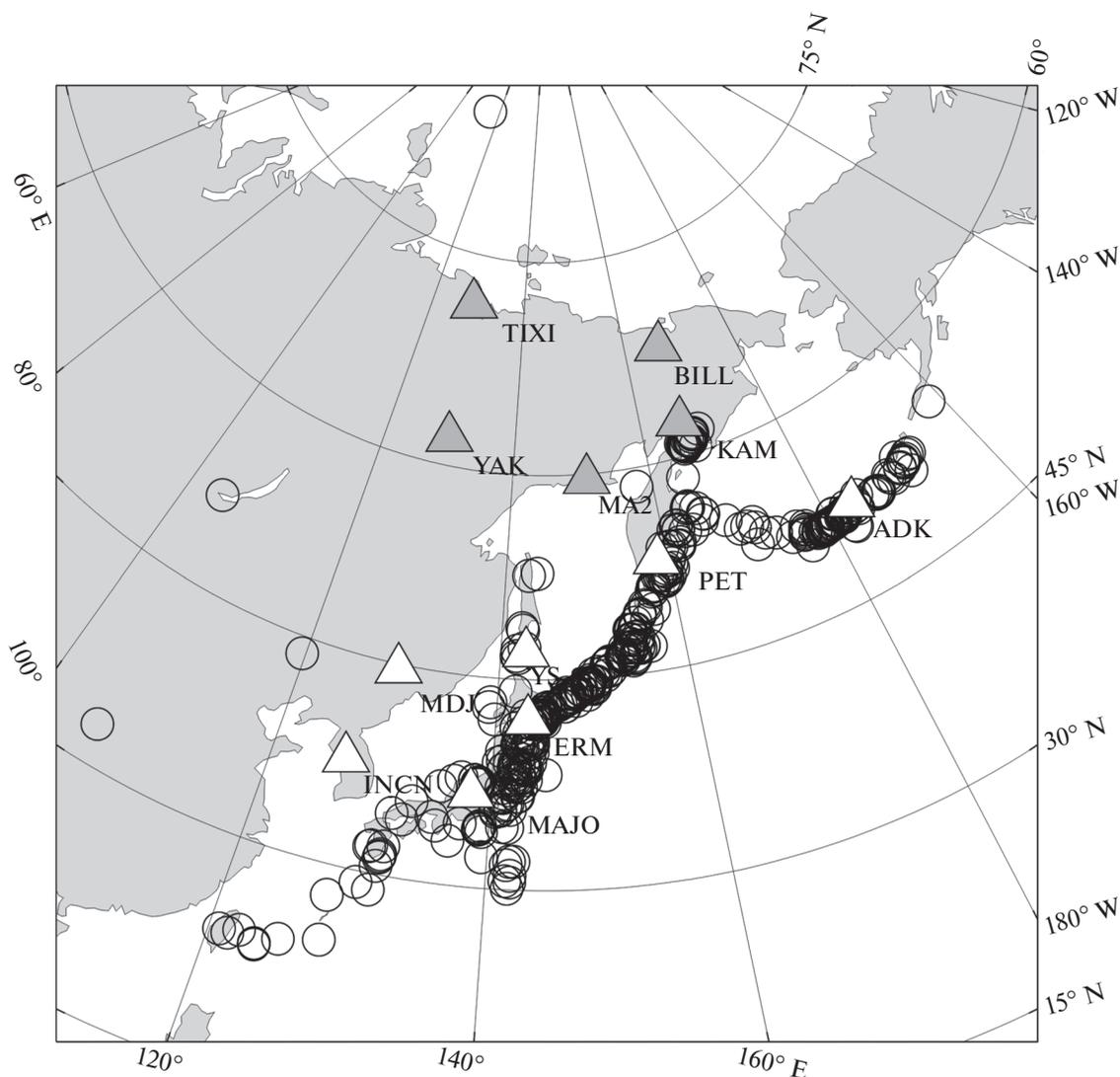


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Северо-Западной части Тихоокеанского региона (кружки) и цифровых сейсмических станций (треугольники), использованных для построения калибровочной функции. Станции разделены на две категории – “островодужные” (белая заливка) и “континентальные” (серая заливка) с разными калибровочными функциями для разных категорий.

от 4.0 до 8.2. Для обработки исходной цифровой записи применялась программа DIMAS разработки сотрудника КФ ГС РАН Д.В. Дроздина [Дроздин, Дроздина, 2010].

Сейсмические станции и эпицентры землетрясений, записи которых были обработаны, представлены на рис. 1.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУД

Для построения калибровочной функции изучали зависимость от расстояния максимальных амплитуд смещения в поверхностных волнах, пропущенных через полосовой фильтр с осевой частотой 0.05 Гц. Применяли физически реализуемый (каузальный) фильтр Баттерворта четвертого порядка с

частотами среза 0.0625 и 0.04 Гц (периоды 16–25 с). Фильтр применяли к сигналу смещения, полученному обратной фильтрацией цифровой записи велосиграфа ВН. Измеренную амплитуду A_{obs} нормировали на ожидаемую амплитуду A_{20° от данного землетрясения на опорном эпицентральной расстоянии $\Delta = 20^\circ$, вычисленную по Пражской формуле согласно значению его телесейсмической магнитуды $M_s(20)$ по каталогу NEIC.

Максимальные амплитуды измерялись во временном окне длительностью 600 с после вступления S -волны ($[t_s, t_s + 600 \text{ с}]$, где t_s – время вступления S -волны). Максимальные значения на каждом из трех каналов измерялись в независимые моменты времени (пример записи землетрясения

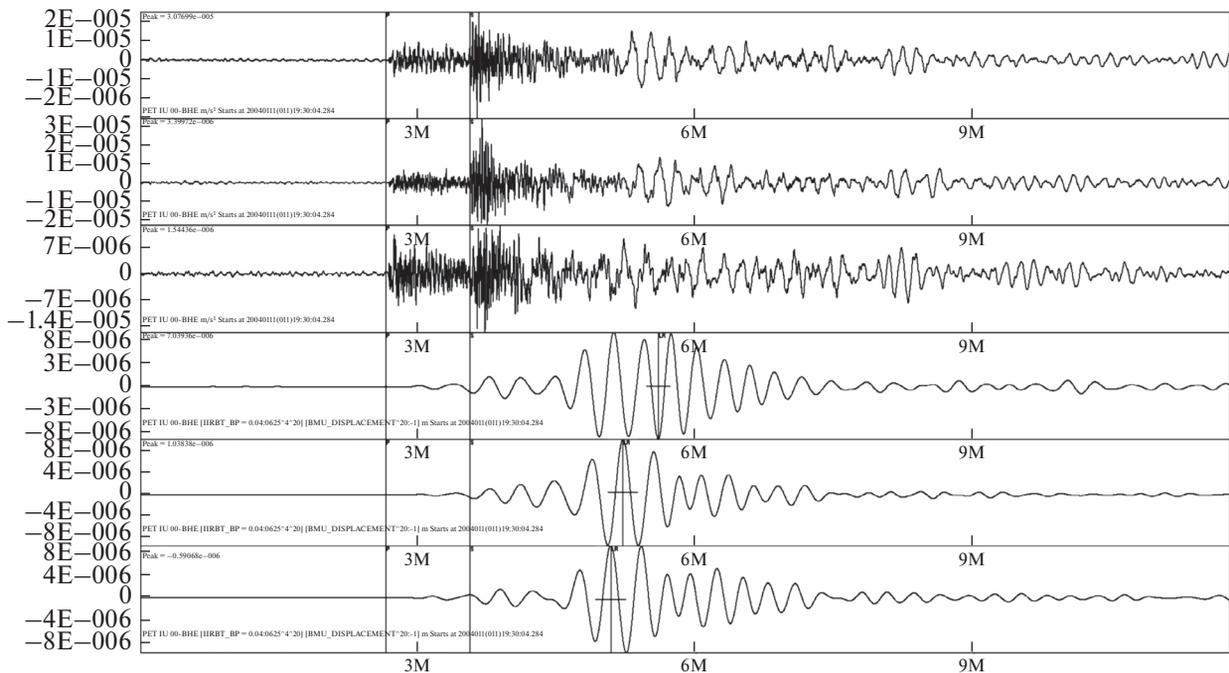


Рис. 2. Пример записи землетрясения и проведенных измерений (копия диалогового окна программы DIMAS). Верхние три трассы — сигналы велосиграфа на компонентах ВНЕ, ВНН, ВНЗ. Нижние три трассы — результат полосовой фильтрации сигнала смещения. Шаг по оси времени (абсцисса) — 3 мин. Вертикальные линии обозначают моменты вступления P - и S -волн и моменты измерения амплитуд профильтрованных поверхностных волн.

и проведенных измерений см. на рис. 2). Для контроля того, максимумы каких именно волн измеряются, была изучена зависимость между моментом обмера максимальной амплитуды поверхностных волн t_L (отсчет от времени в очаге t_0) и эпицентральной расстоянием Δ . Отметим, что за счет фазового сдвига в полосовом фильтре измеренный момент t_L является кажущимся и отстает от идеального примерно на полтора периода (запаздывание $dt_f = 30$ с). Полученные графики $t_L(\Delta)$ см. на рис. 3. Видно, что при выборе условных скоростей 2.95 км/с для вертикальной компоненты (волна Релея) и 3.15 км/с (волна Лява) для более ранней из горизонтальных компонент, моменты t_L неплохо предсказываются. (К расчетным временам пробега поверхностных волн Релея и Лява прибавлено dt_f .) На графиках также отмечены времена t_s . Можно видеть, что максимумы профильтрованной поверхностной волны, в основном, приходят в пределах $\pm 15\%$ от расчетного времени для указанных скоростей.

Для расчета магнитуды по конкретной станции следовало найти способ обобщения обмеров по компонентам. Были опробованы следующие варианты: 1) две амплитуды (и далее две магнитуды): одна по вертикальной компоненте, другая из среднеквадратического значения двух горизонтальных компонент; 2) одна амплитуда (и далее одна магнитуда) из среднего логарифма трех ком-

понент; 3) аналогично, из среднеквадратического значения трех компонент. Соответствующие графики опубликованы в работе [Чубарова и др., 2010]. Было обнаружено, что систематическое различие между амплитудами по вертикальным и горизонтальным компонентам отсутствует, см. рис. 4. Поэтому можно полагать, что объединение данных обмеров трех амплитуд вполне допустимо. Наиболее устойчивые результаты получались по варианту, с использованием среднеквадратического значения трех компонент; этот вариант и использован далее. Такой же путь комбинации данных компонент избран в работе [Singh, Pacheco, 1994].

ПОСТРОЕНИЕ КАЛИБРОВОЧНОЙ ФУНКЦИИ

Принятый общий подход к построению калибровочных функций шкалы $M_s(20R)$ следующий. Для отдельного землетрясения за “истинную” принимается известная телесейсмическая оценка его магнитуды $M_s = M_s(20)_{NEIC}$ из каталога NEIC. Вычисляется расчетное значение A_{20° амплитуды поверхностной сейсмической волны от этого землетрясения на эпицентральной расстоянии 20° по Пражской формуле

$$\lg A_{20^\circ} = M_s(20)_{NEIC} - 3.3 - 1.66 \lg 20^\circ - \lg(T) \quad (1)$$

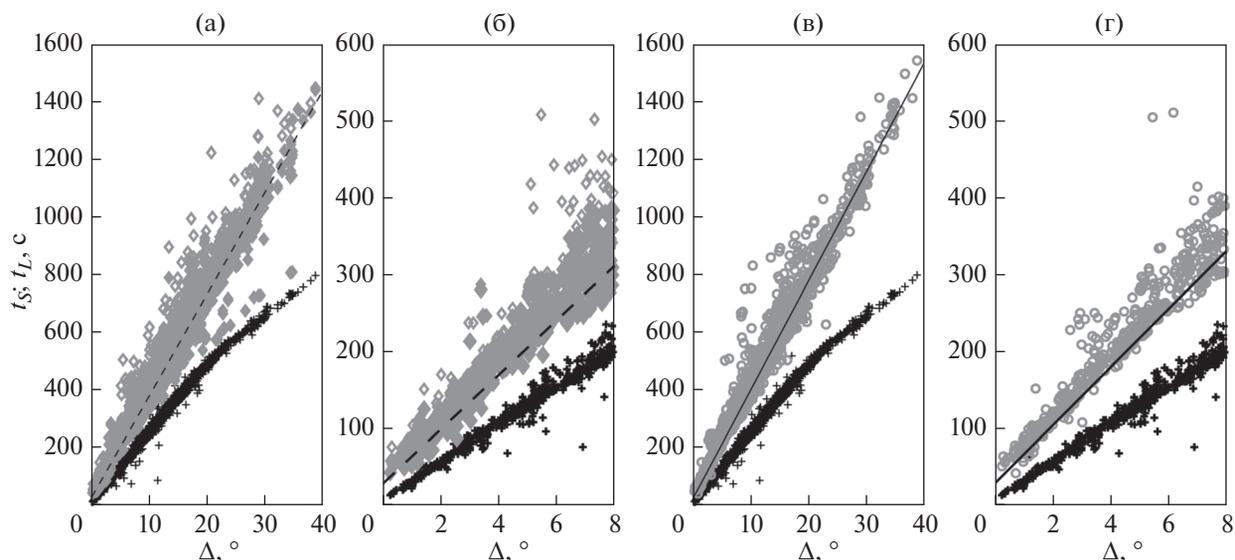


Рис. 3. Зависимость момента t_L обрыва амплитуды смещения от Δ для горизонтальных (а), (б) и вертикальных (в), (г) компонент. Отсчет времени идет от t_0 . На (а), (в) – полный диапазон времен и расстояний, на (б), (г) – только малые эпицентральные расстояния. Прямые линии – расчетные годографы для волн Релея при скорости 2.95 км/с (сплошная) и для волн Лява при скорости 3.15 км/с (пунктирная), с добавкой $dt_f = 30$ с для учета фазового сдвига в фильтре; ромбы – две горизонтальные компоненты, залит значок для более раннего максимума; кружки – вертикальная компонента; крестики – вступления S -волн, снятые с записи.

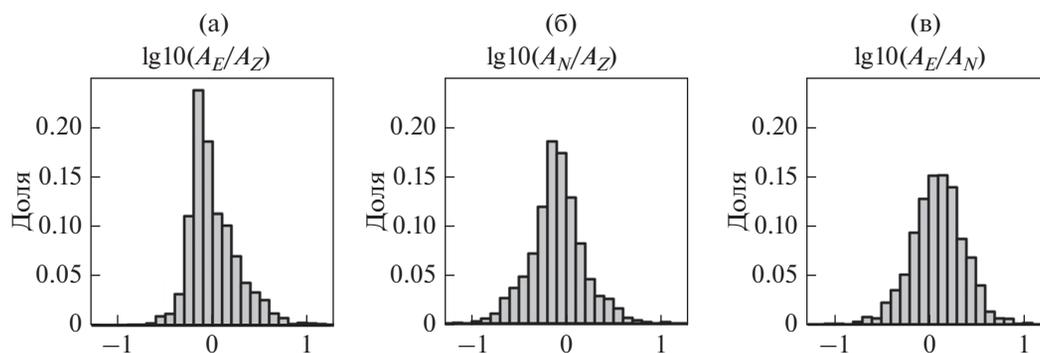


Рис. 4. Нормированные гистограммы логарифмов отношений компонент: (а) – для компонент E и Z , среднее 0.01, стандартное отклонение 0.26; (б) – для компонент N и Z , среднее -0.1 , стандартное отклонение 0.28; (в) – для компонент E и N , среднее 0.1, стандартное отклонение 0.26.

при фиксированном значении $T = 20$ с. Значение A_{20° далее используется для приведения (нормировки) наблюдаемой амплитуды поверхностной сейсмической волны, A_{obs} . Приведенная амплитуда определяется как

$$A_r = A_{\text{obs}}/A_{20^\circ}.$$

Способ определения A_{obs} описан выше. Предполагается, что нормировка в среднем исключает влияние уровня спектра индивидуального землетрясения. Каждое значение A_r , полученное на эпицентральных расстояниях Δ , доставляет одну экспериментальную точку (оценку) зависимости логарифма амплитуды от расстояния – функции

$$a(\Delta) = \lg(A_r(\Delta)).$$

Подразумевается, что анализ данных ведется по записи некоторого землетрясения на некоторой сейсмической станции Дальневосточной сети с эпицентральным расстоянием Δ . По набору оценок $a(\Delta)$, полученных по множеству землетрясений и станций, находится осредненная зависимость $a(\Delta)$, то есть в сущности (с точностью до сдвига) искомая калибровочная функция. Эта схема, однако, требует существенной детализации.

Фактическая разработка настоящей рекомендуемой (2014 г.) версии шкалы $M_s(20R)$ выполнялась в несколько этапов. Их полезно кратко описать, чтобы стал понятен выбор окончательного варианта. Первоначальный вариант калибровочной функции строился в предположении, что

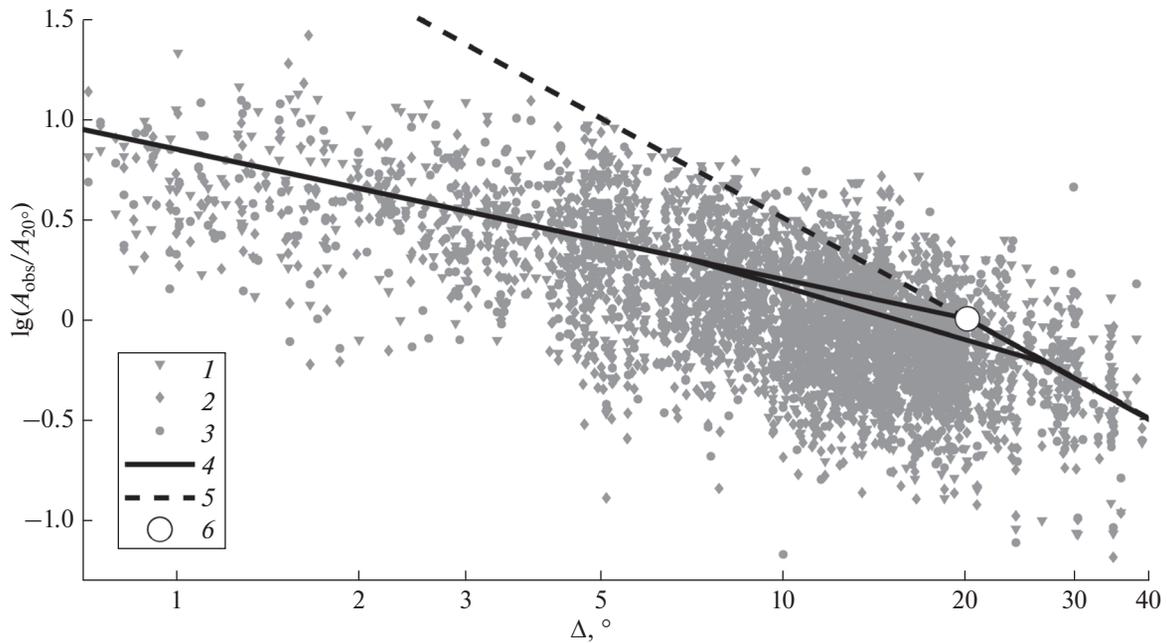


Рис. 5. Наблюдаемые приведенные амплитуды $A_r = A_{\text{obs}}/A_{20^\circ}$ компонент в функции Δ в сопоставлении с первым вариантом калибровочных функций: 1, 2, 3 – компоненты E , N , Z , соответственно; 4 – калибровочные функции в варианте 2009 г.; 5 – калибровочная функция для магнитуды $M_s(\text{BB})$. Последняя приведена только для общей ориентировки; ее различие с данными ожидаемо, так как в расчет $M_s(\text{BB})$ входит измеренный видимый период (при $\Delta < 20^\circ$ обычно $T = 3\text{--}10$ с), а не фиксированный период $T = 20$ с; 6 – точка гипотетического согласования региональной шкалы магнитуд $M_s(20\text{R})$ с телесейсмической шкалой $M_s(20)$ на эпицентральной расстоянии $\Delta = 20^\circ$.

значение A_{20° , полученное по ф-ле (1), в среднем отражает реальный уровень амплитуд этого землетрясения на расстоянии 20° . В таких условиях задача сводилась к нахождению функции $a(\Delta)$ в фиксированном “региональном” диапазоне эпицентральных расстояний, до 20° (~ 2200 км). В идеале, если Пражская формула верна, наблюдаемые данные $a(\Delta) = \lg(A_{\text{obs}}/A_{20^\circ})$ должны лечь на некую кривую, проходящую при эпицентральной расстоянии $\Delta = 20^\circ$ через значение ноль. С учетом данного исходного предположения, средняя зависимость строилась с дополнительным условием $a(\Delta = 20^\circ) = 0$. Такая зависимость была построена и была принята как первоначальное приближение.

Но это приближение сразу потребовало корректировки, так как в явном противоречии с описанной идеальной картиной экспериментальные значения $a(\Delta)$ при Δ около 20° оказывались систематически ниже нуля. При анализе удалось разделить станции на две группы с различными свойствами. Оказалось, что расхождение с Пражской формулой сформировано данными основной группы станций, далее условно называемых “островодужные” (рис. 1). В то же время для “континентальных” станций (рис. 1), расположенных на периферии Евразийского континента, предположение $a(\Delta = 20^\circ) = 0$ оказалось приемлемым. Таким образом, для “континентальных” станций Пражская формула справедлива вплоть до $\Delta = 20^\circ$. В то же время для “островодужных” станций

осредняющая линия при $\Delta = 20^\circ$ проходит ниже нуля (различие порядка -0.15). Поэтому для “островодужных” станций, дабы избежать ступеньки на 0.15 вверх в калибровочной функции, пришлось распространить новую калибровочную функцию на расстояния более 20° . Новая “островодужная” калибровочная функция была состыкована с Пражской формулой при $\Delta = 27^\circ$. Калибровочные функции для каждой группы станций принимались кусочно-линейными, причем на интервале $\Delta = 2^\circ\text{--}7^\circ$ они были приняты идентичными. Детали построения этого (2009 г.) варианта шкалы $M_s(20\text{R})$ и результаты ее опробования на данных отдельных сейсмостанций приведены в работе [Чубарова и др., 2010].

Для иллюстрации данного этапа работы на рис. 5 приведены описанные калибровочные функции, “островодужная” (нижняя) и “континентальная” (верхняя), а также прямая согласно Пражской формуле, все это на фоне полученных эмпирических данных $a(\Delta)$. Хорошо видно, что при $\Delta = 20^\circ\text{--}30^\circ$ данные лежат ощутимо ниже уровня, ожидаемого по Пражской формуле.

Новый (2014 г.) вариант шкалы $M_s(20\text{R})$ был выполнен на основе ревизии исходного подхода, с отказом от требования неперемной стыковки с калибровочной функцией по Пражской формуле вблизи $\Delta = 20^\circ$. Чтобы соответствовать реальности, калибровочная функция шкалы $M_s(20\text{R})$ про-

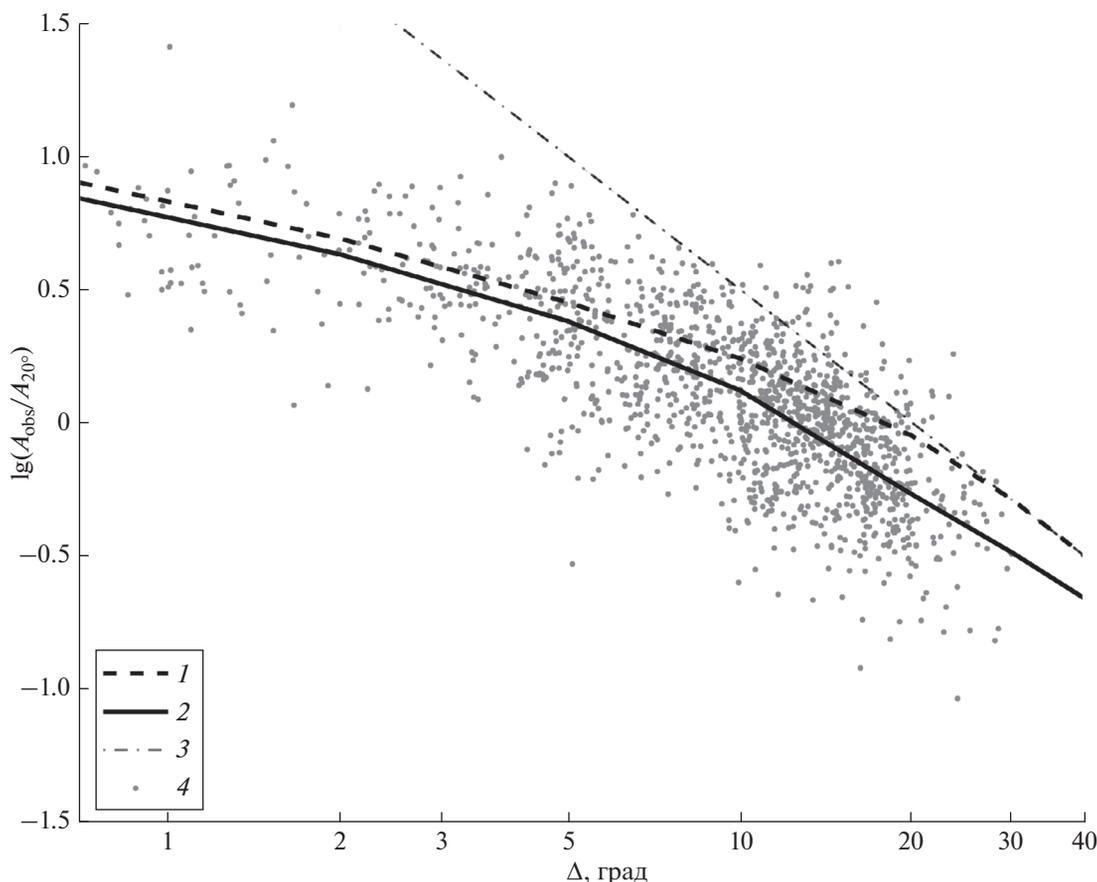


Рис. 6. Нормированные стационарные амплитуды $A_r = A_{\text{obs}}/A_{20^\circ}$ и новые калибровочные функции: 1 – $\tau_1(\Delta)$ для “континентальных” станций, 2 – $\tau_2(\Delta)$ для “островодужных” станций, 3 – калибровочная функция по Пражской формуле, 4 – наблюдаемые данные, полученные по “островодужным” станциям (приведено среднеквадратичное значение трех компонент).

длена до расстояния 40° (4500 км) и в диапазоне 20° – 40° отклоняется от Пражской формулы. При сохранении общего подхода и добавлении некоторого объема нового материала, калибровочные функции для “островодужных” и “континентальных” станций были построены заново с улучшенной детальностью, эти функции теперь не совпадают друг с другом при всех расстояниях. Удалось почти исключить стационарные поправки, уже сильно сниженные в шкале 2009 г. в сравнении со шкалой $M_s(\text{ВВ})$, но все же сохранившиеся там. Однако в одном особом случае от поправки избавиться не удалось, о чем речь ниже. Для изученного региона Дальнего Востока России новый вариант шкалы $M_s(20\text{R})$ не только перекрывает целевой диапазон расстояний 2° – 20° , но вполне может быть рекомендован для использования также и в интервале $\Delta = 20^\circ$ – 40° (2200–4500 км) как уточнение стандартной шкалы $M_s(20)$. Отметим, что численные изменения оценок $M_s(20\text{R})$, связанные с заменой при расчете калибровочной функции 2009 г. (в комбинации с поправками) на функцию 2014 г., невелики. Они не имеют систе-

матического характера и, в подавляющем числе случаев, не превышают ± 0.1 .

Обмеры амплитуд в виде стационарных значений $\lg A_r$ для “островодужных” станций нанесены на рис. 6. По этим данным и аналогичным графикам для “континентальных” станций были построены кусочно-линейные аппроксимации, рекомендуемые ныне как калибровочные функции. Расположение станций двух родов см. на рис. 1.

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ КАЛИБРОВОЧНЫЕ КРИВЫЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТУДЫ $M_s(20\text{R})$ И ПРОЦЕДУРА ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Магнитуда $M_s(20\text{R})$ в текущей (2014 г.) версии определяется формулой:

$$M_s(20\text{R}) = \lg(A/T) + \sigma(\Delta) \equiv \lg(A/T) - \tau(\Delta) + 5.460, \quad (2)$$

где $\sigma(\Delta)$ – калибровочная функция в традиционной записи; $\tau(\Delta)$ – ее модификация, численно определяемая по приведенному ниже алгоритму;

Таблица 1. Значения параметров калибровочных функций дальневосточной региональной шкалы магнитуд по поверхностным волнам $M_s(20R)$ для набора узловых значений эпицентрального расстояния

| Параметры | Эпицентрального расстояния Δ , градусы | | | | | | | |
|------------------------|---|---------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| | $<0.7^{[1]}$ | 0.7 | 2 | 5 | 10 | 20 | 30 | $40^{[2]}$ |
| $\lg(\Delta)$ | — | -0.1549 | 0.3010 | 0.6990 | 1.0000 | 1.3010 | 1.4771 | 1.6021 |
| $\tau_1(\Delta)^{[3]}$ | — | 0.90 | 0.69 | 0.45 | 0.24 | -0.05 | -0.29 | -0.50 |
| $\tau_2(\Delta)^{[4]}$ | — | 0.84 | 0.63 | 0.38 | 0.12 | -0.27 | -0.49 | -0.66 |

Примечание. Для промежуточных значений Δ следует использовать линейную интерполяцию по аргументу $\lg(\Delta)$; ¹ при $\Delta < 0.7^\circ$ калибровочная функция не определена и магнитуда $M_s(20R)$ не может быть вычислена; ² при $\Delta = 30^\circ-40^\circ$ калибровочная функция $\tau_1(\Delta)$ совпадает с Пражской формулой; ³ для континентальных станций; ⁴ для островодужных станций.

Δ – эпицентрального расстояния в градусах, $0.7^\circ \leq \Delta \leq 40^\circ$; A – среднеквадратическое по трем каналам значение максимальной амплитуды смещения на выходе цифрового фильтра, в мкм, во временном окне $[t_s, t_s + 600 \text{ с}]$; t_s – время вступления S -волны; T – период волны, фиксирован как $T = 20 \text{ с}$. При работе с цифровыми записями вместо (A/T) используется $V_{\max}/2\pi$, где V_{\max} – максимальная амплитуда сигнала скорости. Допустимо и рекомендуется определять V_{\max} как половину “двойной амплитуды” (размаха записи). Максимальная амплитуда в выбранном временном окне соответствует либо поверхностной волне, либо, обычно при $\Delta \leq 3^\circ$, неразделимой группе поперечных и поверхностных волн.

Рекомендуемая функция $\tau(\Delta)$ построена в двух вариантах, каждый из которых предназначен для одной из двух групп сейсмических станций:

1) станции, расположенные на удалении от окраинных морей Тихого океана, их условное краткое название “континентальные”. Список изученных станций такого рода включает КАМ, ТИХ1, ВІІІ, УАК, их калибровочная функция обозначена $\tau_1(\Delta)$;

2) станции, расположенные в зоне СЗ Тихого океана и его окраин, включая станции Муданьцзян MDJ и Магадан MA2, их условное краткое название “островодужные”. Список изученных станций такого рода включает РЕТ, АДК, МА2, УСС, MDJ, ІNCN, ЕRM, МАJO, их калибровочная функция обозначена $\tau_2(\Delta)$.

Калибровочные функции задаются своими узловыми значениями для набора узлов Δ из табл. 1, их значения вычисляются, используя линейную интерполяцию по аргументу $\lg(\Delta)$. Следует отметить, что калибровочная функция $\tau_2(\Delta)$ в диапазоне $20^\circ-40^\circ$ определена не вполне надежно и должна применяться с осторожностью (см. ниже). При Δ более 40° (4500 км) следует, во всяком случае, использовать стандартную калибровочную функцию шкалы $M_s(20)$ (Пражскую формулу).

На стыке новой шкалы со шкалой $M_s(20)$ обнаружилось определенное сложение, требующее обсуждения. В табл. 1 (также см. рис. 6) значения $\tau_1(\Delta)$ состыкованы с Пражской формулой при $\Delta = 25^\circ-40^\circ$ и, в сущности, дублируют ее. В то же время значения $\tau_2(\Delta)$ даже при $\Delta = 40^\circ$ продолжают отклоняться вниз от Пражской формулы на 0.16. Данное расхождение формально означает, что подмножество дальневосточных “островодужных” станций как единая группа имеет аномальное поведение в плане стандартной (не новой региональной) магнитудной классификации $M_s(20)$. Данный факт представляет определенный интерес и, в принципе, заслуживает исследования. Но нужно иметь в виду, что приводимые результаты отражают ограниченную статистику имеющихся данных, которые подбирались без учета необходимости изучения магнитудных шкал на таких больших расстояниях. Тем не менее для диапазона $\Delta = 20^\circ-30^\circ$ полученный результат вызывает мало сомнений, так что новые калибровочные кривые вполне допустимо использовать для дальневосточных станций также и в этом диапазоне расстояний. По диапазону $\Delta = 30^\circ-40^\circ$ сделанные рекомендации следует считать временными до уточнений на представительном материале.

ПРОВЕРКА ВНУТРЕННЕЙ СОГЛАСОВАННОСТИ ШКАЛЫ

Для контроля качества оценок магнитуды по новой шкале были рассмотрены невязки станционных оценок магнитуды $\Delta M_{stN} = M_s(20R) - M_s(20)_{NEIC}$. На рис. 7 приведена зависимость невязок ΔM_{stN} от расстояния и магнитуды $M_s(20)$, а также соответствующая гистограмма. Можно видеть, что использование разных калибровочных кривых для “островодужных” и “континентальных” станций позволило избавиться от заметных систематических отклонений во всем рассматриваемом диапазоне эпицентральных расстояний и во всем изученном диапазоне магнитуд.

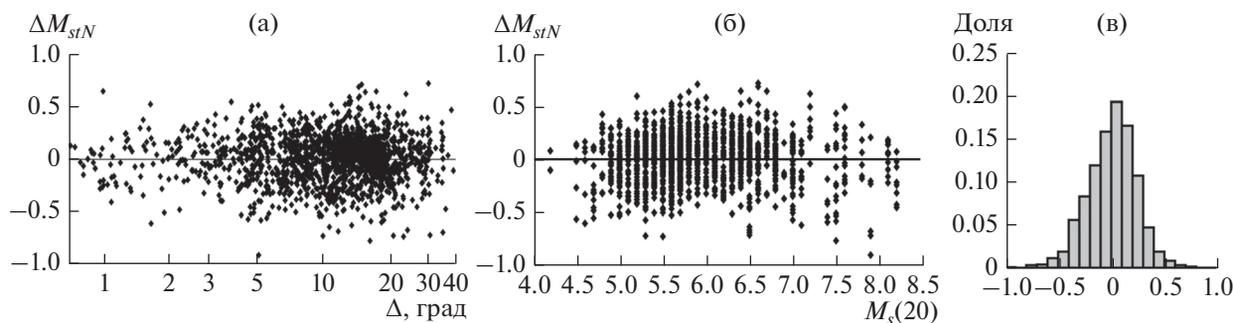


Рис. 7. Невязки станционных оценок магнитуды $\Delta M_{stN} = M_s(20R)_{st} - M_s(20)_{NEIC}$ по соответствующим версиям калибровочной кривой. Данные трех компонент записи усреднялись путем расчета среднеквадратического значения: (а) – невязки ΔM_{stN} в функции эпицентрального расстояния; (б) – невязки ΔM_{stN} в функции магнитуды $M_s(20)$; (в) – нормированная гистограмма невязок. Оценки параметров распределения следующие: среднее 0.01, стандартное отклонение 0.22.

Помимо невязок ΔM_{stN} , интерес представляет также внутрисетевой разброс станционных оценок новой магнитуды $M_s(20R)$ – относительно их собственного среднего $M_s(20R)_R$ по ДВ сети, то есть невязок $\Delta M_{st} = M_s(20R)_{st} - M_s(20R)_R$. В табл. 2 для каждой сеймостанции приводятся параметры распределения ΔM_{st} . Невязки имеют стандартное отклонение 0.18–0.27, что характеризует внутреннюю точность индивидуальных станционных оценок магнитуды по новой магнитудной классификации. Такая точность типична для подобных случаев. Средние невязки станций находятся в пределах ± 0.08 . Здесь и далее стандартные отклонения всегда рассчитывались с поправкой $(n/(n-1))^{0.5}$ для учета малого объема выборки.

Были также получены сводные (суммарно по станциям) характеристики невязок ΔM_{st} (внутрисетевые) и ΔM_{stN} (относительно $M_s(20)_{NEIC}$). Допол-

нительно нашли невязки среднесетевой магнитуды $M_s(20R)_R$ относительно магнитуды $M_s(20)_{NEIC}$, обозначенные ΔM_{RN} . В статистику среднесетевых магнитуд включали лишь землетрясения, зарегистрированные не менее, чем двумя сеймостанциями. Полученные данные приведены в табл. 3 для сети в целом, а также отдельно для “островодужных” и “континентальных” групп станций.

Цифровые данные табл. 2 и табл. 3 позволяют считать, что разработанная шкала не имеет существенных внутренних искажений, а точность оценок, получаемых на ее основе, можно считать приемлемой.

СТАНЦИОННАЯ ПОПРАВКА ДЛЯ СЕЙМОСТАНЦИИ ПЕТРОПАВЛОВСК

Сеймостанция Петропавловск (PET) является опорной в службе оповещения о цунами на

Таблица 2. Параметры распределения станционных невязок магнитуды ΔM_{st}

| Сеймостанция | Число событий | Стандартное отклонение | Среднее | Медиана |
|---------------------------|---------------|------------------------|---------|---------|
| “Островодужные” станции | | | | |
| PET | 295 | 0.20 | -0.01 | 0.01 |
| YSS | 271 | 0.25 | 0.02 | 0.04 |
| MA2 | 59 | 0.23 | 0.06 | 0.06 |
| ADK | 77 | 0.18 | -0.01 | 0.00 |
| ERM | 144 | 0.26 | 0.07 | 0.06 |
| INCN | 145 | 0.20 | 0.05 | 0.08 |
| MAJO | 250 | 0.21 | -0.07 | -0.05 |
| MDJ | 175 | 0.19 | 0.04 | 0.06 |
| “Континентальные” станции | | | | |
| BILL | 57 | 0.21 | -0.01 | -0.03 |
| TIXI | 46 | 0.24 | 0.01 | -0.01 |
| YAK | 24 | 0.20 | -0.03 | 0.04 |
| KAM | 35 | 0.23 | -0.02 | 0.08 |

Таблица 3. Параметры распределения средних невязок магнитуды

| Тип станций | Число событий | Число станционных данных | ΔM_{st}^* | ΔM_{stN} | | ΔM_{RN} | |
|-------------------|---------------|--------------------------|-------------------|------------------|----------|-----------------|----------|
| | | | σ | μ | σ | μ | σ |
| Все | 371 | 1584 | 0.17 | 0.01 | 0.22 | 0.00 | 0.17 |
| “Островодужные” | 366 | 1365 | 0.17 | 0.01 | 0.22 | 0.00 | 0.17 |
| “Континентальные” | 60 | 176 | 0.17 | 0.00 | 0.21 | -0.01 | 0.17 |

Примечания. μ – среднее, σ – стандартное отклонение; * среднее равно нулю автоматически.

Дальнем Востоке России. Ее свойства в плане магнитудной калибровки изучали более детально. При анализе выявилась непредвиденная специфика, заслуживающая изложения.

Были изучены невязки ΔM_{st} для станции РЕТ: $\Delta M_{РЕТ} = M_s(20R)_{РЕТ} - M_s(20R)_R$. Результаты представлены на рис. 8.

Стандартное отклонение невязок $\Delta M_{РЕТ}$ не превышает 0.16 для всех диапазонов расстояний. Медиана распределения невязок для всех расстояний от 0.7° до 40° менее 0.003. Однако невязка

ощутимо зависит от эпицентрального расстояния Δ . При $\Delta < 7^\circ$ средняя невязка составила -0.11 , тогда как для $\Delta \geq 7^\circ$, по заметно большему объему данных, средняя невязка равна $+0.02$. Аналогичный анализ провели и для невязок ΔM_{stN} станции РЕТ относительно магнитуды $M_s(20)_{NEIC}$. Получили близкие результаты: при $\Delta < 7^\circ$ среднее равно -0.11 , а для $\Delta \geq 7^\circ$ аналогичное среднее равно $+0.04$.

Таким образом, данный результат следует считать объективным. Целесообразно при анализе оперативных данных по единичной станции РЕТ,

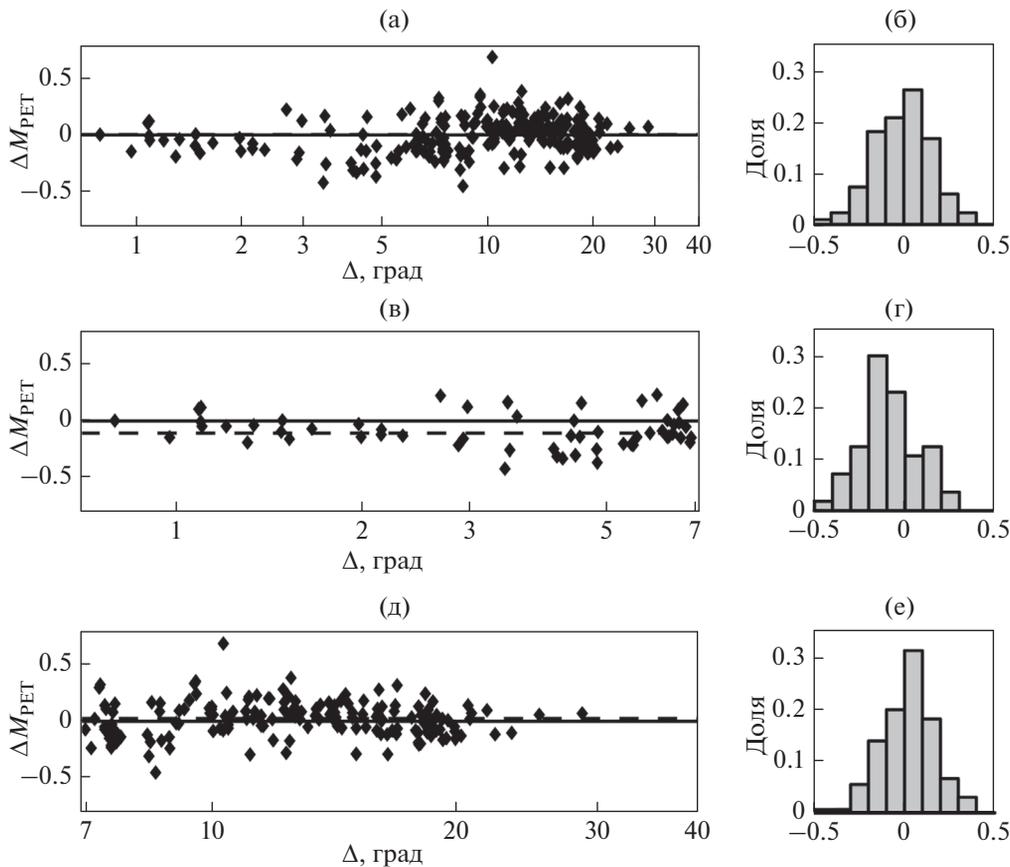


Рис. 8. Невязки оценки магнитуды $M_s(20R)_{РЕТ}$, определенной по сейсмостанции РЕТ, относительно среднесетевой магнитуды $M_s(20R)_R$: (а) – в полном диапазоне расстояний; (б) – соответствующая гистограмма; (в) и (г) – аналогичные графики для малых расстояний; (д) и (е) – аналогичные графики для больших расстояний.

при $\Delta < 7^\circ$, к вычисленному по записи значению $M_s(20R)$ прибавлять поправку +0.1 для компенсации выявленной аномалии. При обобщении данных по сети из более трех станций данную поправку допустимо игнорировать.

Аналогичный контроль провели и для другой опорной станции службы цунами – Южно-Сахалинск (YSS). Существенных для оперативной работы аномалий выявлено не было. Вообще, средние невязки, чуть превышающие 0.05, выявлены для японских ст. MAJO, ERM и для станции Магадан MA2 (табл. 2), но эти станции несущественны для задач оперативного прогноза цунами от близкого сильного землетрясения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новая модификация шкалы M_s Гутенберга, обозначаемая $M_s(20R)$, позволяет иметь на малых эпицентральных расстояниях оценки магнитуды, вполне согласующиеся с телесейсмической шкалой $M_s(20)$. Шкала опирается на амплитуды поверхностных волн узкого диапазона периодов (16–25 с) вблизи периода 20 с для эпицентральных расстояний от 0.7° до 40° (~80–4500 км). На малых расстояниях используется амплитуда неразделимого пакета поверхностных и S -волн. Выделение рабочего диапазона периодов производится путем использования цифрового фильтра. При этом, для расстояний около и более 20° , эффект цифрового фильтра быстро становится пренебрежимо мал, так как полностью включается “природная” фильтрация за счет дисперсии поверхностных волн; в результате здесь возникает упомянутое автоматическое взаимное согласование шкал $M_s(20)$ и $M_s(20R)$.

Шкала магнитуд $M_s(20R)$ позволяет получить устойчивую при обмере, спектрально четко определенную оценку магнитуды на расстояниях 0.7° – 20° , и позволяет сохранить историческую преемственность с классической шкалой M_s Гутенберга. Использование новой шкалы $M_s(20R)$ для изученного региона возможно и в расширенном интервале эпицентральных расстояний 2200–4500 км, где она может служить уточнением стандартной шкалы $M_s(20)$ для этого диапазона расстояний. Шкала $M_s(20R)$ позволяет делать оперативные оценки магнитуды, тесно связанные со значением сейсмического момента на частоте $1/T = 0.05$ Гц. Результат позволит существенно улучшить описание очагов землетрясений Дальнего Востока России. Вариант шкалы 2009 г. внедрен в службу оповещения о цунами дальнего Востока России, включен в алгоритм автоматического оперативного анализа данных БЛИЦ [Чебров, Гусев, 2010] и функционирует успешно [Чебров и др., 2013]. Проверка применимости новой шкалы для станций новой цифровой широкополос-

ной сети российского Дальнего Востока также оказалась успешной (В.Н. Чебров, личное сообщение). Можно полагать, что новая методика построения магнитудной шкалы будет применима и в других регионах России и мира.

Авторы признательны С.А. Викулиной за помощь при обработке данных, Г.М. Бахтиаровой и А.Ю. Чебровой за помощь в подборе данных и М.Я. Малкиной за техническую помощь.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00621) в Камчатском филиале Геофизической службы РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ванек И., Затопек А., Карник В., Кондорская Н.В., Ризниченко Ю.В., Саваренский Е.Ф., Соловьев С.Л., Шебалин Н.В. Стандартная шкала магнитуд // Изв. АН СССР. Сер. геофизич. 1962. № 2. С. 153–158.
- Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.
- Чебров Д.В., Гусев А.А. Автоматическое определение параметров цунамигенных землетрясений на Дальнем Востоке России в режиме реального времени: алгоритмы и программное обеспечение // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 35–57.
- Чебров Д.В., Чебров В.Н., Викулина С.А., Отточук Д.А. Опыт оценки магнитуд сильных землетрясений в РИОНЦ “Петропавловск” в рамках Службы предупреждения цунами. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября–5 октября 2013 г. / Отв. ред. Чебров В.Н. Обнинск: ГС РАН. 2013. С. 299–303.
- Чубарова О.С., Гусев А.А., Викулина С.А. Двадцатисекундная региональная магнитуда $M_s(20R)$ для Дальнего Востока России // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 58–63.
- Соловьев С.Л. О региональных отличиях калибровочной кривой для определения магнитуды землетрясений по поверхностным волнам. Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. Сборник статей в двух томах. М.: ИФЗ АН СССР. 1974. Т. 2. С. 55–59.
- Alewine R.W., III. Theoretical and observed distance corrections for Rayleigh-wave magnitude // Bull. Seismol. Soc. Am. 1972. V. 62. № 6. P. 1611–1619.
- Bormann P., Baumbach M., Bock G., Grosser H., Choy G.L., Boatwright J. Seismic source and source parameters. IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice / Bormann P. (Ed.). GeoForschungsZentrum Potsdam. 2002. V. 1. Chapter 3. P. 1–94.
- Bormann P., Liu R., Ren X., Gutdeutsch R., Kaiser D., Castello S. Chinese national network magnitudes, their relation to NEIC magnitudes, and recommendation for new IASPEI magnitude standards // Bull. Seismol. Soc. Am. 2007. V. 97. P. 114–127.

- Evernden J.F.* Variation of Rayleigh-wave amplitude with distance // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1971. V. 61. P. 231–240.
- Gutenberg B.* Amplitudes of surface waves and magnitude of shallow earthquakes // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1945. V. 35. P. 3–12.
- Herak M., Herak D.* Distance dependence of M_s and calibration function for 20-second Rayleigh waves // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1993. V. 83. P. 1881–1892.
- Marshall P.D., Basham P.W.* Rayleigh wave magnitude scale M_S . *PAGEOPH.* 1973. V. 103. P. 406–414.
- Okal E.A.* A theoretical discussion of time domain magnitudes: the Prague formula for M_S and the mantle magnitude M_m // *J. Geoph. Res.* 1989. V. 94. № B4. P. 4194–4204.
- Panza G.F., Duda S.J., Cernobori L., Herak M.* Gutenberg's surface-wave magnitude calibration function: theoretical basis from synthetic seismograms // *Tectonophysics.* 1989. V. 166. P. 35–43.
- Rezapour M., Pearce G.P.* Bias in surface-wave magnitude M_S due to inadequate distance corrections // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1998. V. 88. P. 43–61.
- Singh S.K., Pacheco J.F.* Magnitude determination of Mexican earthquakes // *Geofisica internat.* 1994. V. 33. P. 189–198.
- von Seggern D.* Amplitude-distance relation for 20-second Rayleigh waves // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1977. V. 67. P. 405–411.