

ОПЫТ ОЦЕНКИ МАГНИТУД СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РИОЦ «ПЕТРОПАВЛОВСК» В РАМКАХ СЛУЖБЫ ЦУНАМИ

Чебров Д.В., Чебров В.Н., Викулина С.А., Ототюк Д.А.

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
danila@emsd.ru*

Введение

РИОЦ «Петропавловск» ведет работу в рамках Службы предупреждения о цунами с момента организации этой службы. Несмотря на коренную модернизацию СПЦ в 2006–2010 гг, в том числе ее сейсмической части, и возросшие возможности по скорости и точности получения параметров землетрясений, и в настоящее время актуальным остается регламент Службы, разработанный для СПЦ-1958.

Одно из существенных положений этого регламента – это правила оценки магнитуды землетрясения и, следовательно, определение его цунамигенности. В качестве опорной магнитуды в РИОЦ «Петропавловск» используется магнитуда M_S^{PET} , рассчитанная по данным единственной станции – РЕТ («Петропавловск»).

В ходе работ над развитием СПЦ была предложена новая, спектрально определенная магнитуда $M_S(20R)$, основанная на поверхностных волнах узкого диапазона периодов (16–25 с). [5] Эта магнитуда должна, в перспективе, заменить устаревшую практику оценки цунамигенности по значениям M_S^{PET} . Данная шкала имеет очевидные преимущества: спектрально определенные оценки, легко формализуемую процедуру обмеров. Кроме того, предполагается использовать сетевую оценку, которая должна быть более устойчива, чем оценка по единственной станции.

Данная работа ставит своей целью изучить опыт оценки магнитуд M_S^{PET} и $M_S(20R)$ в Региональном информационно-обрабатывающем центре «Петропавловск» в оперативном режиме, в рамках Службы цунами и Службы срочных донесений.

Оценки магнитуды M_S по данным станции «Петропавловск»

Известно, что индивидуальные станционные оценки могут иметь заметный разброс от среднесетевых и гораздо менее стабильны. Поэтому, зачастую, для станционных оценок устанавливается индивидуальная поправка, определяемая как среднеарифметическое (или, в некоторых случаях, медиана) невязок магнитуды для некой рабочей выборки. Особенное внимание этому уделялось для опорных станций единой системы сейсмических наблюдений СССР (ЕССН), к которым относится и станция «Петропавловск» [3], кроме того, вскоре после открытия она стала нести службу в рамках Службы цунами. Заметим, что заниженные значения магнитуд для Дальневосточных станций при регистрации тихоокеанских землетрясений были замечены достаточно быстро. [10] Таким образом, вопрос индивидуальной станционной поправки для станции РЕТ всегда стоял очень остро.

Первые определения и методики оценки магнитуды, предложенные ещё в 30-е годы [8], и развитые в 40–50-х [6, 7, 9] давали вполне согласующиеся сведения о величине землетрясения, пока производились однотипными приборами на небольшом количестве станций. Однако, бурное развитие сейсмических приборов и сейсмических сетей высветило проблему неоднозначности определения магнитуды одного и того же землетрясения. К началу 1970-х гг в рамках ЕССН был накоплен достаточно большой опыт энергетических оценок, в том числе и на основе стандартизированной шкалы магнитуд. [11] Это создало предпосылки для широкого обсуждения унификации процедуры энергетической классификации землетрясений.

В рамках этих работ была установлена поправка для магнитуды M_S , определяемой по данным станции «Петропавловск». По результатам работы Ландыревой [1] ее величина оказалась равной -0.6 для землетрясений из Дальневосточного региона, что означает, что оценки РЕТ сильно занижены, относительно среднесетевых, которые в данном контексте принимаются за истинные. Эти результаты использовались в работе Службы срочных донесений ГС РАН, а также в Службе цунами. Ревизия индивидуальной поправки РЕТ, в общем, подтвердила выводы Ландыревой, и до настоящего времени при объявлении тревоги цунами в РИОЦ «Петропавловск» используется поправка -0.5 (или, другими словами, при заданном магнитудном пороге 7.0 тревога цунами по данным станции РЕТ должна объявляться при $M_S^{\text{PET}} = 6.5$).

Заметим, что результаты широкого обсуждения опыта сейсмических наблюдений в СССР отразились в изданной к началу 80-х «Инструкции...» [2], которая на долгое время зафиксировала основные положения при организации сейсмических наблюдений в СССР/России.

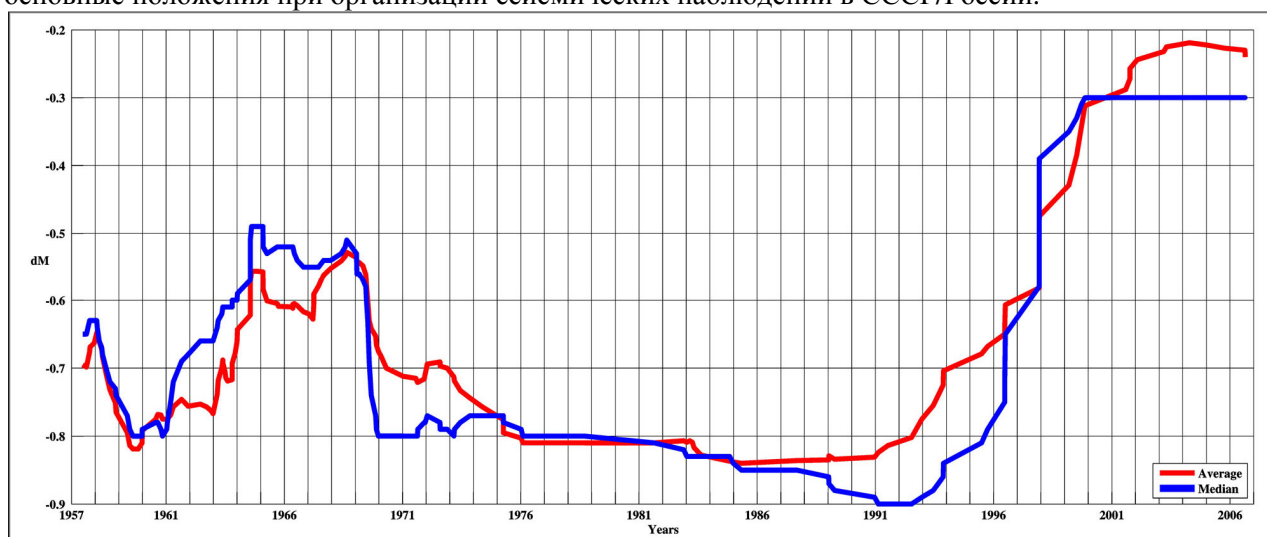


Рис. 1 Временной ход невязки магнитуды $dM = M_S^{\text{PET}} - M_S$ за период с 1957 по 2012 гг, скользящее окно по 20 событий

Начиная с 1998 года станция «Петропавловск» подвергалась постоянному обновлению и улучшению средств регистрации и обработки данных [4]. В 2001 году произошел окончательный переход на цифровую обработку данных, фотоэлектрическая регистрация прекратилась. Также продолжался процесс перехода на обработку землетрясений по данным сети станций. Работы в этом направлении ускорились с началом работ по коренной модернизации Системы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России.

Сейсмическая подсистема (СП) СПЦ разрабатывалась с 2006 года, и введена в эксплуатацию в 2010 году. [12, 13, 14] Станция «Петропавловск» продолжила выполнять свои обязанности по СПЦ на новом уровне, уже как Региональный информационно-обрабатывающий центр в сети сейсмических станций Дальнего Востока России (после реорганизации в 2010 г. – РИОЦ «Петропавловск»).

Таким образом, к настоящему моменту накопилось достаточное количество материала, полученного путем цифровой обработки. Иными словами, поменялись как средства регистрации, так и методы обработки. Учитывая, важность оценки M_S^{PET} для объявления тревоги цунами, эти данные требуют проверки на состоятельность и устойчивость.

Конкретная практическая задача заключается в том, чтобы оценить индивидуальную поправку станции PET для умеренных и сильных землетрясений из зоны ответственности станции «Петропавловск». Здесь имеется в виду зона ответственности по Службе цунами, в которую, согласно действующим регламентам, входят все землетрясения с эпицентральной расстоянием до 1000 км от станции PET.

Итак, параметры изучаемой выборки можно записать так: $M_S \geq 5.5$, $\Delta \leq 1000$ км, $t_0 \leq 2013$ г. Оценки M_S извлекались из окончательного каталога ГС РАН (г. Обнинск), индивидуальные оценки M_S^{PET} – непосредственно из бюллетеней станции «Петропавловск», которые хранятся в архиве станции. Удалось получить оценки станции PET вплоть до 1957 года. В более ранних бюллетенях не содержится прямых оценок M_S , а только замеры амплитуд и периодов. В качестве внешнего контроля результатов, предполагалось использовать результаты работы [1], касающиеся дальневосточных землетрясений.

Уже беглый анализ данных показал, что для последних лет величина поправки -0.5 не соответствует действительности. Это свидетельствует о том, что эта величина меняется во времени. Для того чтобы проанализировать динамику величины $dM = M_S^{\text{PET}} - M_S$, ее значения для каждого землетрясения были нанесены на временную ось, а потом получившийся временной ряд был сглажен методом скользящего среднего, по 20 точек на окно. Значения t для получившихся значений $\overline{dM}(t)$ устанавливались для начала интервала сглаживания. Для таких же окон рассчитывалась скользящая медиана. Полученные временные ряды представлены на Рис. 1.

Анализ изменения dM во времени показывает, что все за все время регистрации станции РЕТ наблюдались несколько выраженных особенностей: относительно высокие значения в период с 1965 по 1970 гг., низкие значения dM с 1971 по 1998 гг., и, наконец, резкий скачок на рубеже веков. Однозначно интерпретировать особенности хода dM до 1998 года затруднительно, но совершенно ясно, что рост значений магнитудной поправки с 1998 по 2000 гг. объясняется постепенным переходом на цифровую регистрацию и обработку сейсмических сигналов. Исходя из этого, целесообразно разделить все время, занимаемое изучаемой выборкой на две эпохи: аналоговой и цифровой обработки/регистрации. Также отдельно проанализирован период с 1969 по 1972 год, который использовался в работе [1]. Любопытно, что выбранный период совпал с высокими значениями dM . Если бы изучался период, скажем, с 1975 по 1990 гг., то принятая поправка для станции Петропавловск могла бы оказаться гораздо ниже.

Итоговые параметры распределений невязок магнитуд для трех выбранных периодов сведены в табл. 1. Оказалось, что для аналоговой эпохи поправка должна была бы быть установлена на уровне -0.7 , а для цифровой – на уровне -0.3 . Этот результат качественно повторяет выводы о более легких оценках дальневосточных землетрясений на станции РЕТ, однако, количественно отличается. Также заметим, что среднеарифметическое dM для периода 1969–1972 гг. близко к результату, полученному в работе [1]. Небольшая разница относится к несколько разным выборкам: 1000-км зона в настоящем исследовании, и весь Дальний Восток в цитируемой работе.

Заметим, что полученная большая разница в магнитудных поправках в разные эпохи вероятнее всего объясняется более устойчивыми процедурами обработки, а также тем, что замеры теперь, преимущественно снимаются с эмулированной по данным широкополосного велосиметра STS-1 (0.1 – 360 с) записи прибора СКД, который имеет спад амплитудно-частотной характеристики начиная с 18–20 секунд. В аналоговую эпоху наряду с СКД использовался прибор СК, у которого спад начинается с 10 секунд. При этом, согласно [3], СКД на станции «Петропавловск» был установлен только в 1967 году и настроен на полосу пропускания 0.2–20 секунд.

Табл. 1. Параметры распределений невязок магнитуд в разные периоды времени

Период	\overline{dM}	$dM_{0.5}$	σ	$X_{0.05}$	$X_{0.95}$	IQR	N
1957—1999	-0.715	-0.7	0.438	-1.5	0.015	0.4	148
2001—2012	-0.307	-0.3	0.293	-0.9	0.205	0.325	30
1969—1972	-0.632	-0.7	0.361	-1.225	0.1	0.4	26

Точность оценок $M_S(20R)$

Перед тем как принять шкалу $M_S(20R)$ в качестве опорной магнитуды Службы цунами, следует, среди прочего, изучить точность ее оценок, особенно полученных в оперативном режиме. Для этой цели будем анализировать распределение величины $dM_S = [M_S(20R) - M_S]$, где $M_S(20R)$ – оценки этой магнитуды в РИОЦ «Петропавловск», а M_S – оценки, произведенные разными сейсмическими агентствами: НЕИС, Службой срочных донесений Геофизической службы РАН (г. Обнинск), а также оценки, произведенные РИОЦ «Петропавловск» с использованием классической шкалы M_S .

Кроме данных, полученных в оперативном режиме, анализировались данные, полученные при обработке землетрясений в отложенном режиме. Отложенный режим обработки позволяет вовлечь в обработку больше станций, тем самым получить более устойчивую сетевую оценку $M_S(20R)$, а также большее количество индивидуальных станционных оценок.

Основываясь на гистограммах распределения dM_S , можно принять в качестве нулевой гипотезы, что данная величина имеет нормальное распределение. Однако, видно, что, несмотря на достаточно хорошее согласие данных, имеются случаи достаточно большой недооценки магнитуды, относительно классических шкал M_S . Поэтому, в качестве характеристик распределения были выбраны не только стандартные величины, такие как среднее арифметическое и среднеквадратичное отклонение, но и значения характерных квантилей (5%, 95%), а также межквартильное расстояние dQ . Значения $X_{0.05}$ и $X_{0.95}$ показывают интервал величины dM_S , в котором находятся 90% элементов конкретной выборки.

Не смотря на то, что магнитуда $M_S(20R)$ используется как сетевая магнитуда, может возникнуть ситуация, когда решение должно быть принято по данным одной станции. Поэтому, были проанализированы оценки магнитуды на отдельных станциях и проведено их сравнение с опорными данными. В данном случае в качестве опорных данных были выбраны оценки M_S , произведенные

РИОЦ «Петропавловск». поскольку именно эта магнитуда использовалась долгое время в качестве опорной в системе цунами. С другой стороны, оценки $M_S(\text{PET})$, $M_S(\text{NIEC})$ и $M_S(\text{OBN})$ находятся в удовлетворительном согласии, и нет особой разницы в том, какие из них привлекать в качестве референсных данных.

Параметры построенных распределений сведены в Табл. 2.

Из представленных таблиц видно, что, в целом, оценка $M_S(20R)$ легче, чем стандартная оценка M_S . Кроме того, оценка $M_S(20R)$, произведенная в отложенном режиме ближе к M_S , чем произведенная в оперативном режиме. Это объясняется не только тем, что в отложенном режиме в обработку вовлечено больше станций, но и тем, что с начала эксплуатации шкалы $M_S(20R)$ опыт работы с ней нарабатывался постепенно.

Также небезынтересно сравнить оценки магнитуды, произведенные на «Петропавловске» и в «Южно-Сахалинске». Как и ожидалось, оценка РИОЦ «Петропавловск», основанная на станции PET оказалась легче, чем оценка на РИОЦ «Южно-Сахалинск».

Табл. 2 Параметры распределения расхождения оценок магнитуд M_S , произведенных РИОЦ «Петропавловск» в оперативном режиме, и другими сейсмическими агентствами

Сейсмическое агентство (шкала магнитуд)	$\overline{dM_S}$	$[dM_S]_{0.5}$	σ_{M_S}	$[dM_S]_{0.05}$	$[dM_S]_{0.95}$	dQ	N
$M_S(20R) - M_S^{NIEC}$	-0.258	-0.3	0.259	-0.6	0.1	0.3	128
$M_S(20R) - M_S^{OBN}$	-0.295	-0.3	0.27	-0.61	0.11	0.3	150
$M_S(20R) - M_S^{PET}$	-0.168	-0.2	0.310	-0.600	0.4	0.4	121
$M_S^{PET} - M_S^{YSS}$	-0.275	-0.2	0.429	-0.855	0.4	0.4	60
$M_S^{PET} - M_S^{NIEC}$	-0.055	0.0	0.232	-0.500	0.3	0.3	115

Оценка магнитуды по поверхностным волнам ($M_S(20R)$, M_S) сильных землетрясений по записям акселерометров в оперативном режиме

Одним из важнейших вопросов надежного функционирования РИОЦ «Петропавловск», как звена Системы предупреждения о цунами является способность выполнять свои обязанности в любой обстановке. В случае больших и сложных систем, несмотря на тщательное проектирование, только продолжительная эксплуатация может выявить такое стечение обстоятельств, при котором функционирования Системы может быть затруднено или невозможно.

Опыт последних лет показал, что обработка сильных землетрясений, произошедших в ближней зоне сети сейсмических станций, может быть существенно затруднена вследствие превышения динамического диапазона на велосиметрах. Это позволяет вовлекать их (хотя и ограниченно) в оценку положения эпицентра, но делает совершенно невозможным использование этих станций в расчетах магнитуды события. Поскольку существующие инструкции предполагают расчет магнитуды по поверхностным волнам по записям велосиметра, оператор вынужден ждать прибытия максимума поверхностной волны на удаленные станции.

Один из наиболее ярких примеров подобной ситуации – землетрясение в Тохоку 2011 года. Тогда наблюдалось превышение динамического диапазона на станциях Южных Курил. В качестве ещё одного примера можно привести сильнейшие события майского роя землетрясений в Авачинском заливе в 2013 году. Ближайшие велосиметры иногда оказывались зашкаленными, при этом магнитуда этих землетрясений не превышала 6.5.

В то же время, на побережье Камчатки уже развернута сеть приборов сильных движений. Очевидная идея – использовать в обработке и оценке магнитуды акселерометры. Для этого надо определить технологию получения оценок и обосновать их состоятельность. С этой целью были отобраны сильные землетрясения последних лет, произошедшие в ближней зоне сейсмической сети, и произведены оценки магнитуд M_S и $M_S(20R)$ с использованием акселерометров и велосиметров. Оценки сравнивались между собой.

Технология получения оценок M_S допускает эмулирование как стандартного прибора СД, так и СКД. Изучается расхождение dM для каждого случая. Расхождение оценок магнитуд определяется по следующей формуле: $dM = M^{\text{vel}} - M^{\text{acc}}$. Сравнение оценок между собой показало незначительную разницу между магнитудой, полученной из записи ускорения и скорости, как для стандартной шкалы M_S , так и для новой шкалы $M_S(20R)$ (менее ± 0.1 для сетевых оценок только по акселерометрам и для большинства индивидуальных оценок).

Заключение

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

Расхождение оценок магнитуды по поверхностным волнам, сделанных на станции РЕТ с окончательными оценками заметно менялось в течение последних 50 лет. Последний сильный скачок был замечен в 1998 году. Очевидно, он связан с техническим перевооружением станции.

Используемая в данный момент при объявлении тревоги цунами поправка к магнитуде $M_S^{\text{РЕТ}}$, которая в настоящий момент составляет -0.5 представляется чрезмерно заниженной оценкой. По результатам эксплуатации СП СПЦ последних 10 лет следует установить эту поправку на уровне -0.3 .

Шкала магнитуд $M_S(20R)$ демонстрирует вполне состоятельные оценки по сравнению с оценками магнитуд по поверхностным волнам других сейсмических агентств. При этом, требуется тщательно проанализировать опыт применения данной магнитуды в реальных условиях с целью введения соответствующих поправок (общих, и станционных)

Разработаны рекомендации к использованию записей приборов сильных движений для энергетических оценок в оперативном режиме. Ожидаемое расхождение в оценках не более 0.1 единицы магнитуды.

Список литературы

1. Ландырева Н.С. Определение MLH при составлении «Сейсмологического бюллетеня сети опорных сейсмических станций ЕССН» / Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. (сб. статей в двух томах) Т. 2. М.: ИФЗ АН СССР – 1974. С. 9—18.
2. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР. М.: Наука, 1981. 272 с.
3. Сейсмическая станция «Петропавловск-Камчатский». Паспорт. Сост.: Синельникова Л.Г. 1986. 43 с.
4. Чебров В.Н., Чебров Д.В., Викулин А.В., Викулина С.А., Ототюк Д.А. Сейсмическая станция «Петропавловск». К 60-летию непрерывных наблюдений. – Обнинск: ГС РАН, 2011. 50 с.
5. 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.
6. Gutenberg B. Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes. Bull. Seism. Soc. Am. 1945. V. 35. P. 3–12.
7. Gutenberg B., Richter, C. F. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. Bull. Seism. Soc. Am. 1956. V. 46. P. 105–145.
8. Richter, C. F. An instrumental earthquake magnitude scale. Bull. Seism. Soc. Am. 1935. V. 25. P. 1–32.
9. Соловьев С.Л. О классификации землетрясений по величине их энергии. // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР, 1955. №30(157).
10. Соловьев С.Л. Сопоставление амплитудных полей объемных волн от Курило-Камчатских и средиземноморских землетрясений // Изв. АН СССР, сер. геофиз. 1964. №4.
11. 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.
12. Чебров В.Н. Развитие системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России. // Вестник КРАУНЦ, Серия Науки о Земле. 2007. №1. Вып. №9. С. 27–36.
13. Чебров В.Н., Гусев А.А., В.К. Гусяков В.К., Мишаткин В.Н., Поплавский А.А. Концепция развития системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России. // Сейсмические приборы. 2009. Т.45. № 4
14. Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Захарченко Н.З., Мишаткин В.Н., Сергеев В.А., Сеницын В.И., Шевченко Ю.В. Опорная сейсмическая станция «Петропавловск» для службы предупреждения о цунами // Сейсмические приборы. 2010. Т.46. № 1.