

© Автор, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.34(571.642)

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.1.022-036>
<https://www.elibrary.ru/wqiuqw>

Новые переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Сахалинского региона

Д. А. Сафонов

E-mail: d.safonov@imgg.ru

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. В связи с методическими изменениями в работе Сахалинского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) возникла необходимость в уточнении переходных соотношений между энергетическими характеристиками землетрясений Сахалинского региона, используемых для магнитудной унификации каталога. Для получения переходных соотношений использована выборка за период с 2017 по октябрь 2024 г. из базы данных регионального информационно-обрабатывающего центра «Южно-Сахалинск», входящего в структуру СФ ФИЦ ЕГС РАН. Методом обобщенной ортогональной регрессии рассчитаны соотношения, связывающие магнитуду коровых ($h < 40$ км) землетрясений M_L и энергетические классы K_p и K_c , а также M_L и M_{PVA} отдельно для коровых и для глубокофокусных ($h = 250–600$ км) землетрясений региона. Также получено соотношение между M_L и магнитудой Японского метеорологического агентства M_j . Показано, что для неглубоких землетрясений Сахалина $M_j \approx M_L$, для глубокофокусных отмечена недооценка величины M_L относительно M_j . В дальнейшем по мере накопления данных предполагается уточнение полученных зависимостей.

Ключевые слова: землетрясение, магнитудные шкалы, регрессионные соотношения, Сахалинский регион

New transition relationships for the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region

Dmitry A. Safonov

E-mail: d.safonov@imgg.ru

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. Due to methodological changes in the work of the Sakhalin Branch of the Federal Research Center “Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences” (SB FRC GS RAS), it became necessary to clarify the transition relationships between the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region used for the magnitude unification of the catalog. To obtain the transition relationships, a sample for the period from 2017 to October 2024 was used from the database of the “Yuzhno-Sakhalinsk” regional information processing center, which is a part of the SB FRC GS RAS. Using the generalized orthogonal regression method, the relationships linking the magnitude of crustal ($h < 40$ km) earthquakes M_L and the energy classes K_p and K_c were calculated, as well as the magnitudes M_L and M_{PVA} separately for crustal and deep-focus ($h = 250–600$ km) earthquakes in the region. The relationship between M_L and the magnitude of the Japan Meteorological Agency M_j was also obtained. It was revealed that for shallow Sakhalin earthquakes $M_j \approx M_L$; for deep-focus earthquakes, an underestimation of the magnitude M_L relative to M_j was noted. As the observational data accumulates, it is assumed that the obtained relationships will be refined.

Keywords: earthquake, magnitude scales, regression relationships, Sakhalin region

Для цитирования: Сафонов Д.А. Новые переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Сахалинского региона. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 1, с. 22–36. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.1.022-036>; <https://www.elibrary.ru/wqiuqw>

For citation: Safonov D.A. New transition relationships for the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 1, pp. 22–36. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.1.022-036>; <https://www.elibrary.ru/wqiuqw>

Финансирование и благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ ГР 124013000764-8) с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Введение

С 2024 г. Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) при обработке сейсмических записей для подготовки окончательного каталога сейсмических событий перешел на программное обеспечение DIMAS (Display, Interactive Manipulation and Analysis of Seismograms) [1], ранее использовавшееся в региональном информационно-обрабатывающем центре (РИОЦ) «Южно-Сахалинск» для составления оперативного каталога.

С 2006 г. в рамках федеральной целевой программы «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 г.» [2] Геофизической службой РАН внедрялась сейсмическая подсистема Службы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России. Созданы региональные информационно-обрабатывающие центры «Петропавловск», «Южно-Сахалинск», «Владивосток». РИОЦ «Южно-Сахалинск», как и остальные региональные центры, с 2011 г. использует ПО DIMAS в обработке цифровых записей с серверов сбора и хранения телеметрических данных для получения параметров землетрясений в Дальневосточном регионе и по всему миру. Результатом такой обработки является оперативный каталог землетрясений, который дает представление о текущей сейсмичности в регионе и на сопредельных территориях.

Ранее для составления окончательного каталога отделом сводной обработки сейсмо-

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS (№ SR 124013000764-8) using the data obtained from a unique research facility “Seismic infrasound array for monitoring Arctic cryolithozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

логических данных (ОСОСД) Сахалинского филиала использовался программный комплекс MGP [3], разработанный около трех десятилетий назад, в конце эпохи аналоговых сейсмологических наблюдений и бумажных сейсмограмм.

В основных характеристиках землетрясений, получаемых с использованием MGP и DIMAS, есть некоторые различия. В частности, это касается энергетических параметров землетрясений. Как и ранее, измерение пиковых значений скоростей основных групп волн для определения магнитуд проводится после эмуляции цифровых записей к характеристикам аналоговых приборов для использования магнитудных шкал, разработанных в 1960–1980-х годах. Несмотря на то что методики снятия замеров амплитуд и периодов колебаний в РИОЦ «Южно-Сахалинск» и ОСОСД в целом одинаковы, результаты определения основных энергетических характеристик землетрясений с использованием MGP и DIMAS, как отмечалось в [4], значительно расходятся.

Кроме того, изменился и перечень определяемых энергетических характеристик землетрясений. Так, ОСОСД определял две магнитуды по поверхностной волне (M_{LV} и M_{LH}), пять магнитуд по объемной волне (M_{PV} , M_{PH} , M_{PVA} , M_{SH} , M_{SHA}) и два энергетических класса (K_p , K_c) (см. табл. 1 в [4]), при этом не все из определяемых величин попадали в итоговый каталог. Основными энергетическими характеристиками землетрясений в данных РИОЦ «Южно-Сахалинск» на сегодняшний день являются энергетические классы С.Л. Соловьева и О.Н. Соловьевой K_c [5] и Т.Г. Раутиан K_p [6], магнитуда по поверхностной волне M_s ,

по объемной волне M_{PVA} (M_{PSP}) и M_{PV} (M_{PLP}) [7], а также магнитуда Ч.Ф. Рихтера M_L по объемной волне S [8], исследованию возможностей использования которой в дальневосточной части РФ посвящена статья [4]. Такой подбор энергетических характеристик охватывает весь частотный диапазон записей и величину землетрясений от слабых и умеренных до сильных.

Наиболее распространенной энергетической характеристикой землетрясений в каталоге РИОЦ является магнитуда M_L , определяемая для большинства региональных землетрясений независимо от их величины и глубины гипоцентра. В работе [4] представлены корреляционные соотношения M_L и других энергетических характеристик, принятых в рутинной обработке землетрясений в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН, выполненные по данным каталога РИОЦ за 2017–2021 гг. В окончательных каталогах СФ ФИЦ ЕГС РАН значения данной магнитуды до настоящего момента не публиковались, хотя, ввиду массовости ее определения и доступности для всего диапазона глубин и региональных расстояний, они могут быть использованы в качестве базовой энергетической характеристики каталога.

Другой массово определяемой энергетической характеристикой землетрясений с длительным периодом использования в различных регионах Северной Евразии, включая Сахалинский, является энергетический класс Т.Г. Раутиан K_p [6]. Разработанный для сейсмически активных регионов Средней Азии, он получил широкое распространение на территории СССР и по-прежнему является основой многих каталогов континентальной части России. В пределах зоны ответственности за регистрацию землетрясений СФ ФИЦ ЕГС РАН K_p определяется в пределах Приамурья и Приморья и Сахалинского региона.

Энергетический класс Соловьева K_C первоначально разработан для неглубоких (40 ± 30 км) курильских землетрясений. Вопрос о применимости номограммы для определения класса коровых сахалинских землетрясений не был подробно изучен. Тем не менее, эта энергетическая характеристика длительное время определяется для сахалинских событий, довольно массовая и устойчивая.

Все энергетические характеристики землетрясений публикуемых каталогов филиалов ФИЦ ЕГС РАН должны сводиться к унифицированной расчетной магнитуде, обычно в каталогах ГС РАН соответствующей магнитуде по поверхностной волне M_S (M_{LH}) или моментной магнитуде M_W [9]. Хотя ранее мы получили часть переходных соотношений между M_L Рихтера и региональными магнитудами каталога [4], это сделано на относительно небольшом объеме данных, к тому же без разделения на регионы. А как показывает сравнение, в Приамурье и Приморье, Сахалинском и Курило-Охотском регионах соотношения между магнитудами могут серьезно различаться. Поэтому желательно получить отдельные межмагнитудные соотношения для регионов зоны ответственности за регистрацию землетрясений Сахалинского филиала.

Цель работы – получить на основе имеющихся данных переходные соотношения между основными энергетическими характеристиками землетрясений Сахалинского региона по каталогу РИОЦ «Южно-Сахалинск» СФ ФИЦ ЕГС РАН, а также привязать их к магнитуде M_S для обеспечения преемственности каталога и возможности расчета сейсмической энергии, являющейся основным показателем сейсмичности региона.

Методика

Наиболее распространенный метод получения межмагнитудных соотношений – расчет ортогональной стандартной регрессии (OSR). Этот метод дает лучшие результаты, чем метод стандартной линейной регрессии (SLR) [10], к тому же позволяет получить соотношение, которое можно использовать в обе стороны. Однако в случае сравнения двух величин разного масштаба – магнитуды и энергетического класса землетрясения – метод OSR неприменим. В этом случае необходимо перейти к обобщенной (generalized) ортогональной регрессии (GOR), где в качестве одного из параметров поиска выступает соотношение квадратов стандартной ошибки определения сравниваемых величин

$\eta = \bar{\sigma}_y^2 / \bar{\sigma}_x^2$, где y и x – сравниваемые величины. В [10] показано, что в случае известной величины η метод GOR предпочтительнее OSR для сравнения различных магнитудных шкал, за исключением тех случаев, когда $\eta \approx 1$.

Регрессионные соотношения рассчитывались с помощью ПО Matlab. В качестве основы для вычислений использован алгоритм «deming» [11]. Методический подход применялся ранее в [4, 12]. Результат данной работы дополнительно проверен при помощи нового выполненного в Matlab алгоритма, использующего метод расчета погрешностей из [13], аналогичный показанным в [10, 14] и дающий результат расчета интервала погрешности, слегка (в третьем значащем знаке) отличный от получаемого в алгоритме «deming».

Исходные данные

Использована выборка из базы данных землетрясений РИОЦ «Южно-Сахалинск» за период наблюдений с 2017 по октябрь 2024 г. для района с координатами 45–56° с.ш., 140–146° в.д. (рис. 1). Район почти полностью совпадает с Сахалинским регионом СФ ФИЦ ЕГС РАН, за исключением небольшой территории на юго-востоке, включенной для увеличения количества глубоких землетрясений. Более ранние данные не использовались, так как до 2017 г. определение магнитуды M_L и заполнение базы велось в тестовом режиме. Всего в выборке каталога содержится 4741 землетрясение с эпицентрами в пределах выбранного района (включая 276 глубокофокусных),

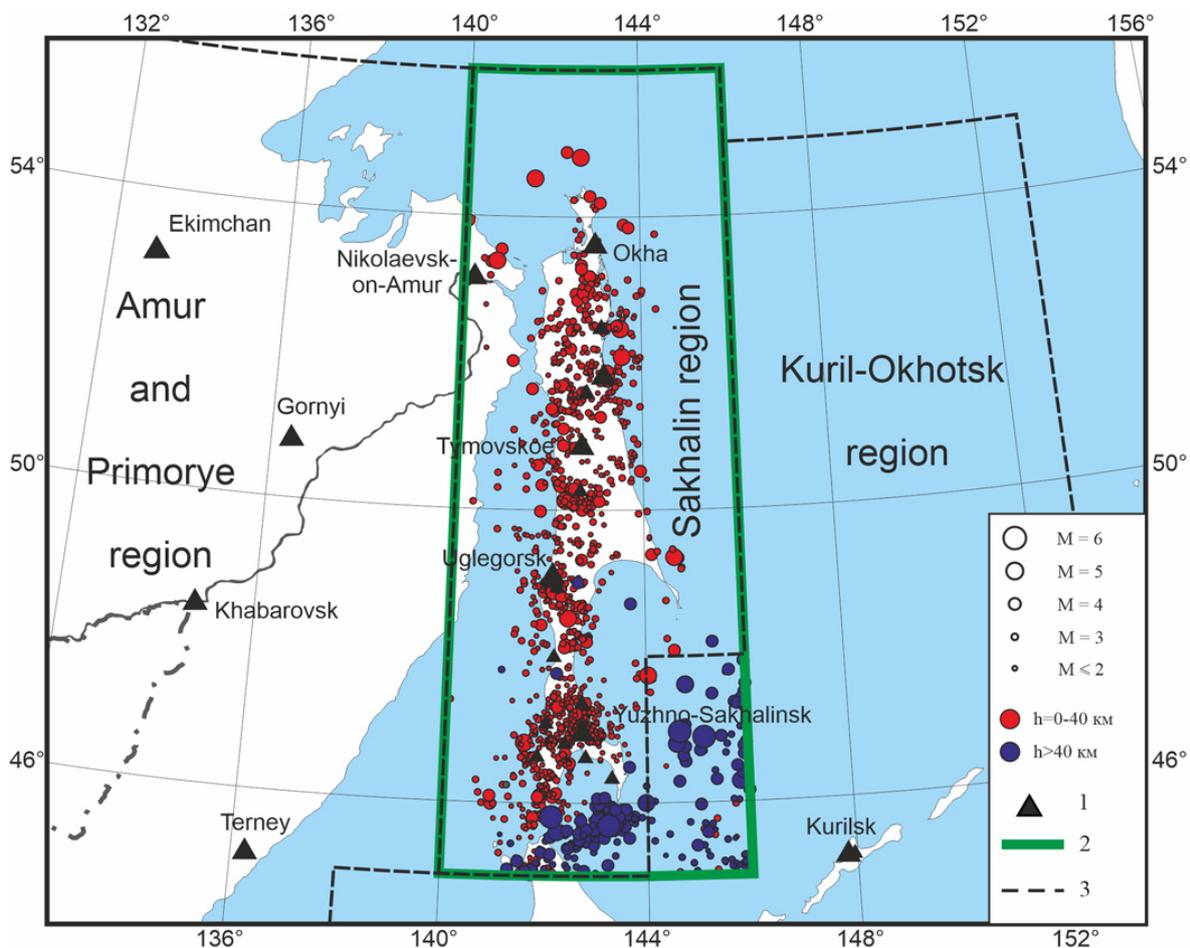


Рис. 1. Район исследования и эпицентры землетрясений по данным каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск». Показаны эпицентры землетрясений выборки с известными значениями M_L . 1 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН; 2 – границы района исследования; 3 – границы регионов СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Fig. 1. Research area and earthquake epicenters according to the catalog of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC. The earthquake epicenters of the sample with known M_L values are shown. 1 – seismic stations of SF FRC GS RAS; 2 – boundaries of the research area; 3 – boundaries of the regions of SF FRC GS RAS.

для 78 % которых определена M_L , для 70 % – K_p , для 52 % – K_c , для 17 % – M_{PVA} , для 1.3 % – M_s . Магнитуда M_{PV} в данной работе не рассматривалась, ее определений очень мало. При этом для дальнейших расчетов использовались только значения магнитуд землетрясений, определенные не менее чем по двум-трем замерам на сейсмических станциях – таким образом, общее количество сравниваемых по магнитуде событий еще уменьшилось. Количество задействованных в расчете величин указано ниже в таблицах (таблицы 1 и 2).

К расчету стандартной ошибки определения энергетических характеристик привлечены данные о 60 060 станционных (выполненных под данным одной сейсмостанцией) замерах максимумов амплитуд и периодов различных фаз сейсмических волн землетрясений по базе данных РИОЦ «Южно-Сахалинск».

В качестве независимо определяемой энергетической величины для сопоставления использована магнитуда Японского метеорологического агентства JMA [15] – M_j . Привлечены значения магнитуды M_j и данные о ее определении на различных сейсмических станциях. К моменту выполнения работы на сайте Агентства доступны данные каталога и бюллетеня JMA по март 2023 г. Магнитуда M_j строится на комбинировании нескольких магнитудных шкал, отличающихся диапазоном применения и методикой, определяется либо по максимумам смещения (M_D , M_d), либо по максимальной скорости смещения (M_V , M_v) для землетрясений на локальных и региональных расстояниях, также имеется различие в диапазоне применимости в зависимости от количества используемых станций (заглавная или строчная буква в индексе). Хотя при оценке стандартной ошибки не делалось различий в конкретном подвиде M_j , в подавляющем большинстве случаев это магнитуда по скорости M_v .

Также использовались данные сейсмологического агентства NIED, Япония [16], это позволило получить значения M_j для нескольких сейсмических событий, произошедших после марта 2023 г. Всего задействовано 382 значения M_j землетрясений из упомянутой выше выборки. Для получения значений стан-

дартной магнитудной ошибки определения M_j привлечено 3579 отдельных станционных оценок из бюллетеня землетрясений JMA с эпицентрами в пределах района исследования.

Стандартная ошибка магнитудных определений

Так же как ранее в [12], на основе станционных оценок была рассчитана величина средней стандартной ошибки определения сравниваемых магнитуд и энергетических классов.

Стандартное отклонение станционной магнитудной оценки одного события рассчитывается как

$$\sigma_{ст} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M})^2}{k - 1}}, \quad (1)$$

где M_i – оценка магнитуды (энергетического класса) события по одной станции, \bar{M} – средняя магнитуда по данным k станций. Среднее стандартное отклонение станционной ошибки с учетом N событий данной магнитуды в каталоге:

$$\bar{\sigma}_{ст} = \frac{1}{N} \sum \sigma_{ст}. \quad (2)$$

Средняя стандартная ошибка магнитуды с учетом количества задействованных в ее определении станций:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{N} \sum \frac{\sigma_{ст}}{\sqrt{k}}. \quad (3)$$

Полученные значения, а также количество землетрясений N и среднее количество отдельных станционных оценок на событие k_{cp} отражены в табл. 1. Для M_L и K_C оценки хорошо согласуются с опубликованными [12] для каталога Курило-Охотского региона. Как указывалось в [12], средние значения $\bar{\sigma}$ видятся заниженными, такой учет погрешности описывает только случайную ошибку показателей магнитуды для каждого данного землетрясения, полученную при снятии замеров, но не учитывает в должной мере другие источники разброса данных, которые могут повлиять на оценки магнитуды [17]. Однако в следующих расчетах

Таблица 1. Среднее стандартное отклонение стационарной оценки ($\bar{\sigma}_{ст}$) и средняя стандартная ошибка ($\bar{\sigma}$) определения энергетических характеристик землетрясений Сахалинского региона

Table 1. The average standard deviation of the station estimates ($\bar{\sigma}_{ст}$) and the average standard error ($\bar{\sigma}$) of determining the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region

Показатель	$M_L(c)$	$M_L(d)$	K_p	$K_C(k3)$	$M_{PVA}(k3)$	$M_{PVA}(d)$	$M_j(c)$	$M_j(d)$
N	1800	168	1360	948	209	179	92	88
$k_{ср}$	3.52	2.95	3.21	4.74	4.30	5.16	7.10	8.27
$\bar{\sigma}_{ст}$	0.324	0.240	0.622	0.568	0.446	0.295	0.257	0.294
$\bar{\sigma}$	0.180	0.142	0.362	0.334	0.226	0.135	0.116	0.119

потребуется не непосредственно эти значения, а только их соотношение, потому можно использовать эти величины в расчете на то, что это не окажет большого влияния на результат.

Магнитуда M_L Ч.Ф. Рихтера [8] разработана для неглубоких землетрясений южной Калифорнии. Как показано в [4], ее применение в Курило-Охотском и Сахалинском регионах дает устойчивые значения магнитуды землетрясений в широком диапазоне глубин и расстояний. Наиболее спорным решением, по мнению автора настоящей статьи, является определение этой магнитуды для глубокофокусных событий, поскольку в оригинальной формуле используется эпицентральное, а не гипоцентральное расстояние. Чтобы избежать существенного занижения оценок магнитуды таких землетрясений, в статье [4] дана рекомендация не использовать определения этой магнитуды на сейсмостанциях, эпицентральное расстояние до которых меньше глубины гипоцентра $\Delta < h$. Поэтому для данной работы значения магнитуды M_L каталога, включающего данные с 2017 г., были пересчитаны с учетом принятой методической поправки в расчете на то, что в дальнейшем формулы будут использоваться для данных, полученных с учетом указанного ограничения. На величины M_L коровых событий удаление стационарных оценок, не отвечающих условию $\Delta < h$, практически не повлияло, тогда как число магнитудных оценок M_L для глубокофокусных событий в выборке сократилось очень существенно (с 229 до 168). Однако это также позволило уменьшить среднюю стандартную ошибку определения магнитуды глубокофокусных землетрясений в пределах региона с $\bar{\sigma} = 0.394$ до $= 0.240$.

Магнитуда M_{PVA} и класс Соловьева K_C , несмотря на массовое определение, выделяются довольно большим количеством отдельных стационарных определений, сильно отличающихся от средней величины. В [12] для уменьшения влияния таких случаев в расчетах использовались только те землетрясения, M_{PVA} которых определена по данным как минимум пяти сейсмостанций. В случае относительно небольшого каталога исследуемого района такое существенное урезание количества значений M_{PVA} и K_C нежелательно, поэтому использованы оценки этих величин для коровых событий по данным как минимум трех сейсмостанций (k3). В табл. 1 приведены значения $\bar{\sigma}$ для $M_{PVA}(k3)$ и $K_C(k3)$, рассчитанные в соответствии с этим условием. Как видно из таблицы, значения стационарной и средней стандартной ошибки для M_{PVA} все равно остаются очень высокими, а для K_C величина средней стандартной ошибки определения ниже, чем для более стабильного K_p . Для M_{PVA} глубокофокусных событий, а также всех остальных магнитуд и энергетического класса K_p величина $\bar{\sigma}$ рассчитывалась для значений, полученных по данным как минимум двух станций.

Отдельно получена стандартная ошибка определения магнитуд M_L и M_{PVA} для глубокофокусных ($h > 250$ км) землетрясений с очагами в пределах Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны, эпицентры которых попадают в пределы исследуемого района. В табл. 1 эти значения приведены в столбцах $M_L(d)$ и $M_{PVA}(d)$, величины для коровых событий обозначены соответственно $M_L(c)$ и $M_{PVA}(k3)$.

По данным сейсмологического бюллетеня ЖМА [15] были получены среднее стандартное

отклонение стационарной оценки и средняя стандартная ошибка определения магнитуды M_L для коровых $M_L(c)$ и глубоких $M_L(d)$ землетрясений региона. Для этого использованы три выборки землетрясений в пределах района исследований в период январь–март 2020 г., январь–март 2021 г. и январь–март 2022 г. (3 раза по 7–8 декад).

Результаты и обсуждение

В настоящий момент при оперативном определении параметров коровых сахалинских землетрясений РИОЦ «Южно-Сахалинск» наиболее часто использует три энергетических характеристики: магнитуда M_L , энергетические классы K_p и K_C . Поэтому для унификации каталога в первую очередь имеет смысл связать регрессионными соотношениями эти три величины.

На рис. 2 а показана полученная методом GOR зависимость между M_L и K_p . Большое количество данных позволило получить устойчивую зависимость в широком диапазоне применимости:

$$0 \leq M_L \leq 5.5, 5.0 \leq K_p \leq 13.0;$$

$$M_L = 0.68(\pm 0.01)K_p - 3.27(\pm 0.11). \quad (4)$$

Ранее в работе [4] уже публиковалась зависимость между этими величинами по данным каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» за 2017–2021 гг. На рис. 2 а она показана зеленой линией. При вычислении методом GOR в [4] было сделано допущение, что ошибка определения энергетического класса вдвое превышает ошибку определения магнитуды ($\eta = 0.25$). Это предположение подтвердилось в данной работе (табл. 1). Добавление данных наблюдений еще за три года слабо повлияло на зависимость. Наклон кривой немного увеличился, однако разница в расчете по двум зависимостям не превышает для верхнего предела применимости ($M_L = 5.5$) 0.12 магнитудной единицы. Для получения новой зависимости использовано в 5 раз больше пар значений, что позволило сильно снизить погрешность определения коэффициентов регрессионной прямой и расширить пределы применимости.

На рис. 2 б показана зависимость между M_L и энергетическим классом Соловьева K_C :

$$0.5 \leq M_L \leq 5.0, 3.5 \leq K_C \leq 11;$$

$$M_L = 0.63(\pm 0.02)K_C - 1.79(\pm 0.14). \quad (5)$$

Опубликованная в [4] зависимость получена по обобщенному каталогу Сахалинского и Курило-Охотского регионов, причем большая часть данных взята именно по курильским землетрясениям. По этой причине полученная в [4] зависимость (зеленая линия на рис. 2 б) отличается от новой на ≈ 0.2 величины M_L для всего диапазона значений. Это подтверждает целесообразность получения отдельных переходных соотношений для разных регионов зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН. Также на рис. 2 б показана зависимость между M_L и классом Соловьева K_C по версии каталогов ОСОСД, опубликованная в [4]. Как упоминалось выше, неясные методические особенности определения этой величины разными отделами СФ приводят к существенному расхождению результатов. Это показывает нежелательность использования ранее применявшихся в ОСОСД переходных формул к данным РИОЦ.

Магнитуда по объемной волне Р – M_{PVA} [18] не слишком часто определяется для сахалинских землетрясений. Вероятнее всего, это связано с высоким разбросом ее оценки по отдельным станциям и, как следствие, слабым доверием к этой шкале у операторов. На рис. 2 с показано полученное методом GOR соотношение между M_L и M_{PVA} для коровых ($h \leq 40$ км) землетрясений Сахалинского региона:

$$1.0 \leq M_L \leq 5.0, 3.0 \leq M_{PVA} \leq 5.0;$$

$$M_L = 1.95(\pm 0.27)M_{PVA} - 4.81(\pm 1.07). \quad (6)$$

Малое количество данных и узкий диапазон значений не позволяют оценить коэффициенты переходного соотношения с высокой точностью.

Для сравнения на рис. 2 приведена зависимость между M_L и M_{PVA} из [4], полученная для землетрясений преимущественно Курило-Охотского региона 2017–2021 гг. для всего диапазона глубин (синяя линия). Очевидна

существенная разница между двумя соотношениями.

Глубокофокусные землетрясения в пределах Сахалинского региона в основном происходят в диапазоне глубин $h = 250\text{--}600$ км. Таким образом, сейсмические волны от таких собы-

тий подходят на ближайšie региональные сейсмостанции снизу. С одной стороны, это затрудняет определение M_L , так как для ближайших сейсмостанций $\Delta < h$. С другой стороны, особенность записи таких событий с четким выделением максимумов фаз P- и S-волн по-

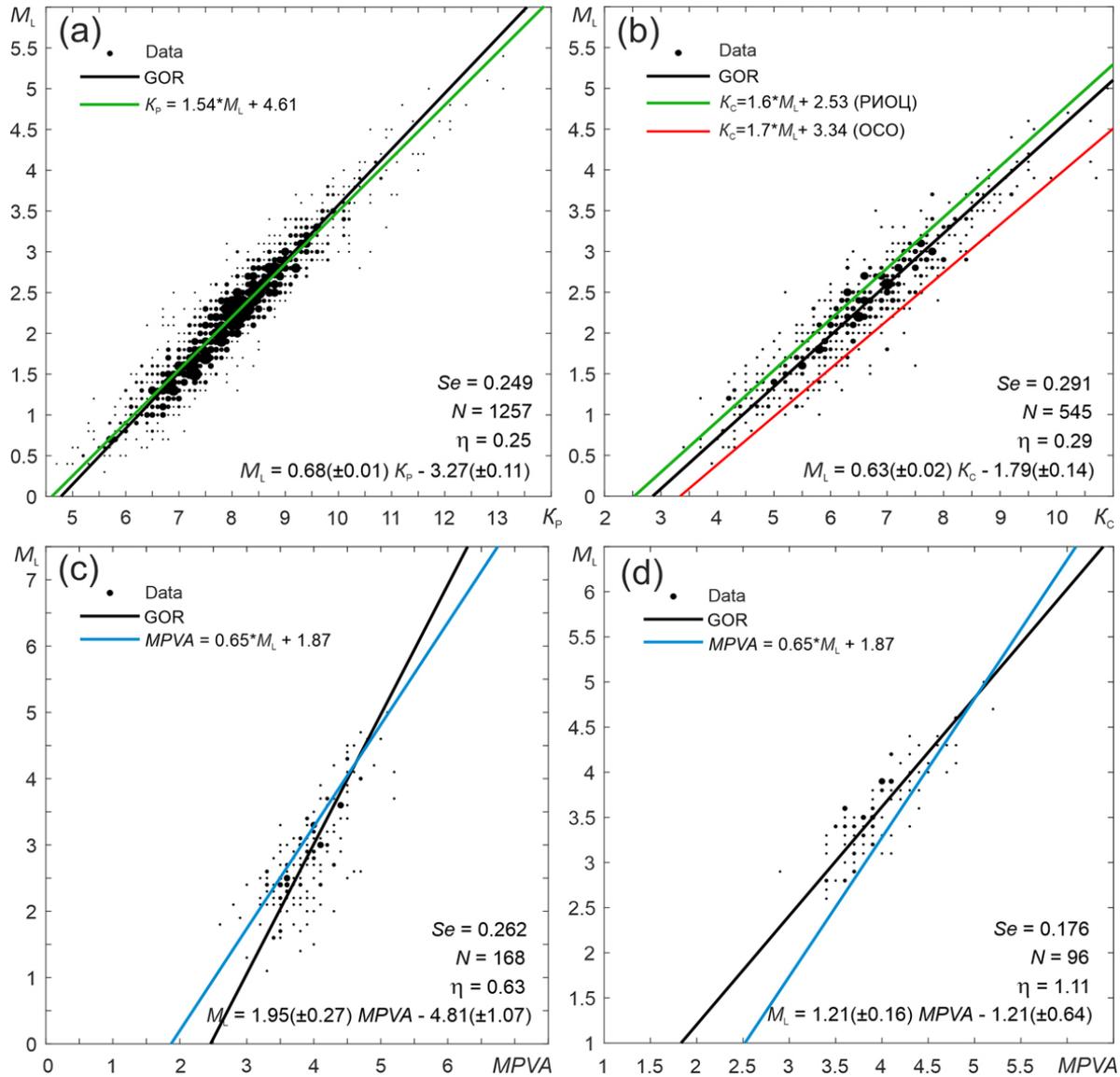


Рис. 2. Зависимость между магнитудой M_L и другими энергетическими характеристиками землетрясений каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» СФ ФИЦ ЕГС РАН 2017–2024 гг.: (а) энергетическим классом Раутиан K_p ; (б) энергетическим классом Соловьева K_C ; (с) магнитудой M_{PVA} коровых ($h < 40$ км) землетрясений; (д) магнитудой M_{PVA} глубокофокусных ($h = 250\text{--}600$ км) землетрясений. Размер кружков увеличивается с ростом числа данных в них. Черной линией показана линейная зависимость, полученная методом GOR, приведены уравнения, количество пар значений N , стандартная ошибка регрессии Se и коэффициент η . Цветными линиями показаны варианты зависимости, предложенные в работе [4].

Fig. 2. The relationship between the magnitude M_L and other energy characteristics of earthquakes in the catalog of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPС of the SF FRC GS RAS from 2017 to 2024: (a) Rautian’s energy class K_R ; (b) Soloviev’s energy class K_C ; (c) the magnitude M_{PVA} of crustal ($h < 40$ km) earthquakes; (d) the magnitude M_{PVA} of deep-focus ($h = 250\text{--}600$ km) earthquakes. The size of the dots is proportional to the amount of data. The black line shows the linear dependency obtained by the GOR method. The regression equations, the number of pairs of values N , the standard error of the regression Se and the coefficient η are given. The colored lines show the dependency options proposed in the paper [4].

зволяет снимать замеры амплитуд и периодов с высокой точностью, это приводит к значительному уменьшению стандартной магнитудной ошибки, что подтверждают расчеты (табл. 1). На рис. 2 d показана зависимость между M_L и M_{PVA} для глубокофокусных землетрясений исследуемого района:

$$2.5 \leq M_L \leq 5.0, 3.0 \leq M_{PVA} \leq 5.5:$$

$$M_L = 1.21(\pm 0.16) M_{PVA} - 1.21(\pm 0.64). \quad (7)$$

Полученная формула существенно отличается от формулы (6) для коровых событий, а также от формулы для всего диапазона глубин из [4], которая усреднила данные землетрясений с разной глубиной очага, вследствие чего синяя линия на рис. 2 с и 2 d имеет коэффициент наклона средний между значениями зависимостей (6) и (7). В работе [12] автор с использованием данных каталога Курило-Охотского региона СФ ФИЦ ЕГС РАН показал, что в параметрах магнитудной шкалы M_{PVA} слабо учтена зависимость от глубины очага, поэтому формулы для пересчета из M_{PVA} в другие магнитуды для событий с глубиной очага до 70 км и более глубоких должны быть разные. Верность этого утверждения удалось продемонстрировать на основе каталога РИОЦ.

Переходные соотношения между M_L и M_{PVA} не отличаются высокой точностью в связи с малым количеством данных. С ростом числа наблюдений необходимо их уточнить и более подробно исследовать зависимость этих магнитуд от глубины очага.

Зависимость между двумя энергетическими классами, определяемыми в Сахалинском регионе,

$$K_C = K_P - 1.7(\pm 0.3) \quad (8)$$

была получена Л.С. Оскорбиным и Л.Ф. Волковой по данным 300 сахалинских землетрясений, магнитудой не превышающих $M = 4.5$ [19]. Можно проверить выполнение этой простой зависимости на основе данных каталога РИОЦ за 2017–2024 гг. На рис. 3 а показана регрессионная зависимость между энергетическими классами, полученная методом GOR с учетом полученных выше стандартных ошибок определения этих величин:

$$4.0 \leq K_C \leq 11.0, 5.0 \leq K_P \leq 12.0:$$

$$K_C = 1.05(\pm 0.04)K_P - 2.07(\pm 0.29). \quad (9)$$

Как видно из сравнения положения линий зависимостей (8) (зеленая на рис. 3 а) и (9) (черная на рис. 3 а), разница между двумя энергетическими классами остается почти постоянной для слабых землетрясений в диапазоне имеющих для сравнения данных. Для быстрого перехода между K_C и K_P можно продолжать использовать соотношение (8), возможная ошибка пересчета по сравнению с (9) при этом будет меньше средней стандартной ошибки определения энергетического класса. Сравнение показало также устойчивость этих энергетических шкал. По всей видимости, методика определения соблюдается достаточно хорошо.

В работе [4] отмечалась высокая степень схожести оценок магнитуды M_L землетрясений Сахалинского и Курило-Охотского региона за период 2017 – март 2020 г. с магнитудой Японского метеорологического агентства [15] M_j :

$$M_j = 1.02(0.03)M_L - 0.04(0.10). \quad (10)$$

С учетом возможной ошибки определения коэффициентов зависимости (10) можно считать, что $M_j \approx M_L$. Это объясняется изначальной калибровкой шкалы JMA по магнитуде Ч.Ф. Рихтера и позволяет легко сопоставлять магнитуду региональных землетрясений соседних сейсмологических агентств, а также использовать M_j , которая применяется в регионе уже свыше полувека, как эталон и прокси-магнитуду для установления простых переходных соотношений к другим региональным и глобальным шкалам, прямой пересчет которых в региональную M_L затруднен отсутствием необходимого для сравнения объема данных. Однако необходимо проверить выполнение зависимости (10) для землетрясений Сахалинского региона.

На рис. 3 б показано облако значений M_j в сравнении с M_L для коровых землетрясений Сахалинского региона (преимущественно южной его части, расположенной ближе к сейсмологической сети Японии). Рассчитанное методом GOR соотношение, полученное по этим данным:

$$2.0 \leq M_L \leq 4.5, 2.0 \leq M_j \leq 4.5:$$

$$M_L = 0.95(\pm 0.07)M_j + 0.11(\pm 0.20). \quad (11)$$

Малое количество пар значений и узкий диапазон данных не позволяют получить надежную переходную формулу, однако, с уче-

том точности определения коэффициентов регрессии, действительно можно считать для коровых землетрясений Сахалина $M_j \approx M_L$. Новое соотношение получилось несколько отличным от предыдущего (синяя линия на рис. 3 б), основная причина отличия – использование

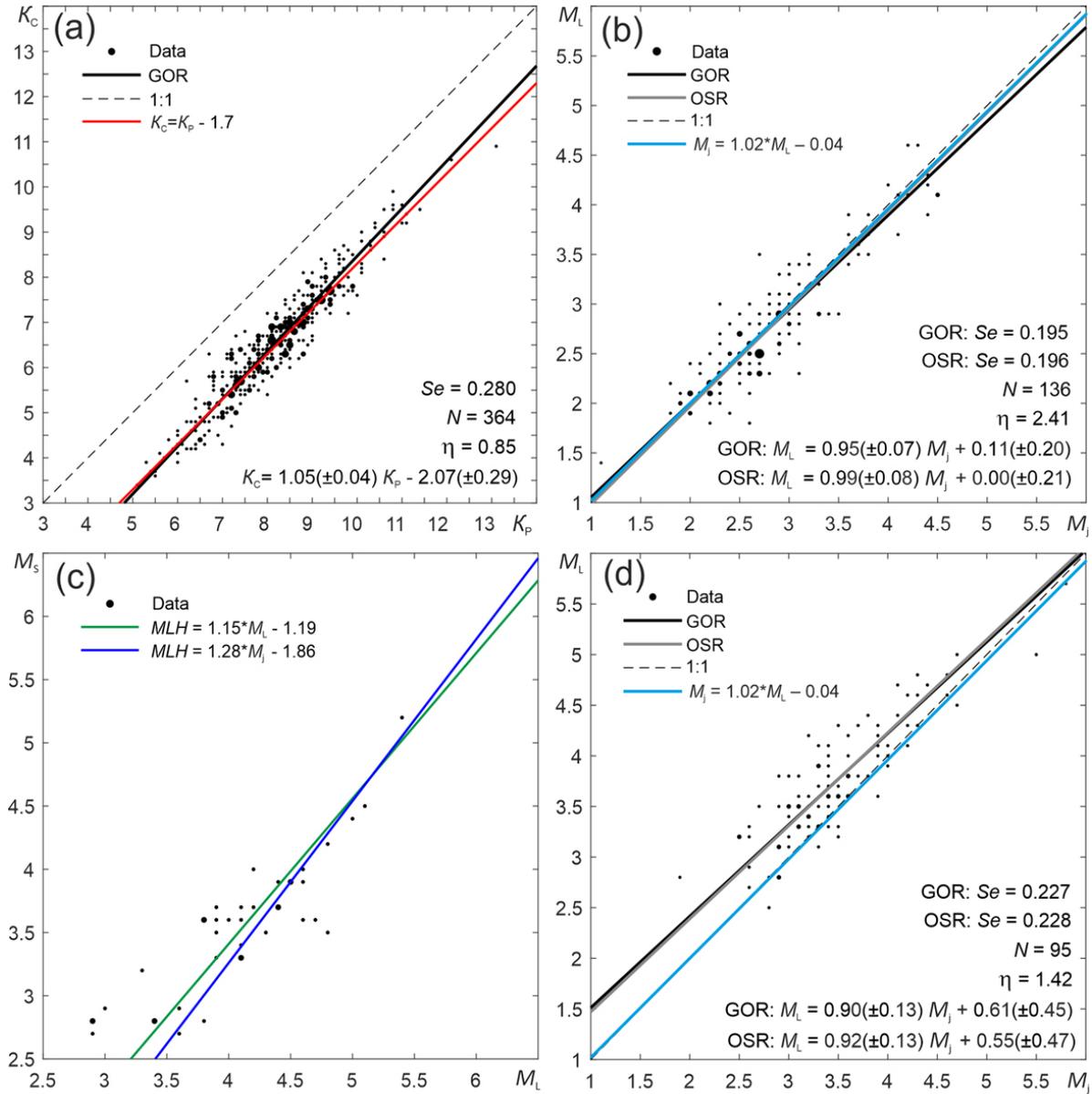


Рис. 3. Зависимость между энергетическими характеристиками землетрясений Сахалинского региона: (а) энергетическими классами Раутиана K_p и Соловьева K_c ; (б) магнитудами M_j и M_L для коровых ($h < 40$ км) землетрясений; (с) магнитудами M_L и M_S ; (д) магнитудами M_j и M_L для глубоких ($h = 250\text{--}600$ км) землетрясений. Сплошной черной линией показана линейная зависимость, полученная методом GOR, серой – методом OSR. Приведены регрессионные уравнения, количество пар значений N , стандартная ошибка регрессии Se и коэффициент η . Цветными линиями показаны варианты зависимости, предложенные в работах [4, 19, 20].

Fig. 3. The relationship between the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region: (a) the energy classes of Rautian's K_R and Soloviev's K_C ; (b) the magnitudes M_j and M_L for crustal ($h < 40$ km) earthquakes; (c) the magnitudes M_L and M_S ; (d) the magnitudes M_j and M_L for deep ($h = 250\text{--}600$ km) earthquakes. The solid black line shows the linear relationship obtained by the GOR method; the gray line shows the one obtained by the orthogonal standard regression method. Regression equations, the number of pairs of values N , the standard error of the regression Se and the coefficient η are given. The colored lines show the dependency options proposed in the papers [4, 19, 20].

метода GOR. При расчете методом OSR (серая линия на рис. 3 б), который ранее был применен для получения (10), соотношение получается мало отличимым.

Отдельно была рассчитана зависимость между M_j и M_L для глубокофокусных землетрясений Сахалинского региона:

$$2.5 \leq M_L \leq 5.0, 2.5 \leq M_j \leq 5.0:$$

$$M_L = 0.90(\pm 0.13)M_j + 0.61(\pm 0.45). \quad (12)$$

Ввиду еще меньшего количества данных и их большого разброса ошибка определения коэффициентов очень велика, тем не менее очевидно, что полученное соотношение (рис. 3 д) отличается от (10). Для глубокофокусных землетрясений магнитуда M_L определяется с занижением относительно M_j , увеличивающимся с уменьшением магнитуды событий. Ранее нами изучалась [4] устойчивость определения M_L в сравнении с M_j для глубоких ($h > 60$ км) землетрясений на основе каталога Курило-Охотского региона 2017 – марта 2020 г., но такого эффекта выявлено не было. В каталоге преимущественно присутствовали события промежуточной глубины ($h = 60–300$ км), для которых было установлено $M_j \approx M_L$. Более глубокие землетрясения отдельно не исследовались, так как в собранном для сравнения каталоге их было слишком мало. Несомненно, соотношения (11) и (12) требуют пересмотра после накопления большего количества данных, однако с учетом имеющихся можно констатировать, что величины M_j и M_L в Сахалинском регионе действительно близки, хотя о полном совпадении шкал M_j и M_L речь не идет. Для коровых землетрясений разница в определении магнитуд событий лежит в пределах стандартной ошибки определения. Для глубокофокусных событий региона необходимо учитывать некоторое занижение магнитудных оценок.

Наиболее сложный вопрос, который необходимо решить для изучения сейсмичности Сахалинского региона на основе каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН, – расчет сейсмической энергии. В статьях, посвященных региональной сейсмичности Сахалинского региона [21], мы ранее использовали для расчета сейсмической энергии E формулу Гутенберга–Рихтера [22]:

$$\lg E = 4.8 + 1.5M, \quad (13)$$

где под M понимается магнитуда по поверхностной волне M_s (в случае каталога ОСОСД – M_{LH}). Каталог РИОЦ «Южно-Сахалинск» содержит определения M_s , однако в пределах исследуемого района их очень немного ($N = 43$ за рассматриваемый период). Хорошим вариантом было бы получить переходную формулу между M_s и M_L каталога РИОЦ для Курило-Охотского региона и распространить ее на Сахалинский регион, это допустимо, поскольку M_s определяется в основном для достаточно сильных неглубоких событий по записи станций, расположенных на расстоянии не менее $\Delta = 1^\circ$ от эпицентра, т.е. используются как региональные, так и телесейсмические сейсмостанции, а потому локальные особенности распространения сейсмических волн не должны оказывать столь заметного влияния. Однако данные расчеты выходят за рамки настоящей работы. В статье [4] приведена такая зависимость, полученная для очень небольшой выборки ($N = 46$) курильских землетрясений:

$$M_{LH} = 1.15(\pm 0.26) M_L - 1.19(\pm 1.29). \quad (14)$$

Учитывая высокую погрешность полученных коэффициентов регрессии, эту зависимость сложно рекомендовать к использованию. В качестве альтернативного варианта можно применить зависимость между M_{LH} и M_j , полученную автором на основе большого количества данных ($N = 964$) о неглубоких ($h \leq 60$ км) землетрясениях Курило-Охотского региона [20]:

$$M_{LH} = 1.28(\pm 0.06)M_j - 1.86(0.29), \quad (15)$$

в предположении, что $M_j \approx M_L$.

На рис. 3 с показаны пары значений магнитуд M_L и M_s каталога Сахалинского региона с 2017 по октябрь 2024 г. Обе линии, отвечающие выражениям (14) и (15), проходят примерно через центр облака значений, в стороне остается лишь несколько наиболее слабых событий с $M_s < 3.0$, определение магнитуды которых несколько сомнительно, так как на расстоянии $\Delta > 1^\circ$ поверхностные волны слабых

сейсмических событий чаще всего сложно отличить от сейсмического шума. Обе предложенные формулы с примерно одинаковой (довольно низкой) точностью позволяют оценить величину M_S региональных землетрясений пересчетом из M_L , а следовательно, получить оценку сейсмической энергии.

Другим вариантом расчета сейсмической энергии коровых землетрясений, часто применяемым в филиалах ФИЦ ЕГС РАН [9], является использование энергетического класса Раутиан [6]:

$$\lg E = K_p. \quad (16)$$

Применив для пересчета полученные соотношения (4) и (9), можно получить оценку сейсмической энергии для всех слабых и умеренно-сильных ($M < 5.6$) коровых землетрясений Сахалинского региона. Для более сильных событий обычно доступен вариант с непосредственно определенной магнитудой M_S и формулой (13). Необходимо учитывать, что затухание сейсмической энергии в земной коре Сахалинского региона выше, чем в условиях континентальной коры, потому что использование K_p может привести к ее недооценке.

Таким образом, проблему оценки сейсмической энергии землетрясений каталога РИОЦ

«Южно-Сахалинск» пока нельзя считать решенной, необходимо большее количество данных. Предложенные варианты можно рассматривать как временную меру.

Полученные методом GOR соотношения собраны в табл. 2. В графе «диапазон применения» приведены границы применимости для величины, указанной в скобках в графе «сравниваемые величины». С учетом обычно линейной связи между однотипными магнитудами по объемным волнам, определяемыми в близких частотных диапазонах (к которым с оговоркой на масштаб можно отнести и энергетические классы), границы применимости можно немного расширить в обе стороны.

Заключение

Подготовлен рабочий каталог параметров землетрясений Сахалинского региона за период с 2017 по октябрь 2024 г. по данным РИОЦ «Южно-Сахалинск», входящего в структуру СФ ФИЦ ЕГС РАН. На их основе рассчитаны средние стандартные ошибки определения двух магнитуд и двух энергетических классов землетрясений, наиболее часто встречающихся в каталоге РИОЦ.

Таблица 2. Регрессионные соотношения между энергетическими характеристиками землетрясений Сахалинского региона по данным РИОЦ «Южно-Сахалинск» и JMA, полученные методом GOR

Table 2. Regression relationships between the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region according to the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC and JMA data obtained by the GOR method

№	Сравниваемые величины	η	N	Se	Регрессионное соотношение	Диапазон применимости
1	$M_L(K_p)$	0.25	1257	0.249	$M_L = 0.68(\pm 0.01)K_p - 3.27(\pm 0.11)$	5.0–13.0
2	$M_L(K_C)$	0.29	545	0.291	$M_L = 0.63(\pm 0.02)K_C - 1.79(\pm 0.14)$	3.5–11.0
3	$M_L(M_{PVA})$ с	0.63	243	0.309	$M_L = 1.95(\pm 0.27)M_{PVA} - 4.81(\pm 1.07)$	3.0–5.0
4	$M_L(M_{PVA})$ d	1.11	96	0.176	$M_L = 1.21(\pm 0.16)M_{PVA} - 1.21(\pm 0.64)$	3.0–5.5
5	$K_C(K_p)$	0.85	364	0.280	$K_C = 1.05(\pm 0.04)K_p - 2.07(\pm 0.29)$	5.0–12.0
6	$M_L(M_j)$ с	2.41	136	0.195	$M_L = 0.95(\pm 0.07)M_j + 0.11(\pm 0.20)$	2.0–4.5
7	$M_L(M_j)$ d	1.42	95	0.227	$M_L = 0.90(\pm 0.13)M_j + 0.61(\pm 0.45)$	2.5–5.0

Примечания. Допуски коэффициентов регрессии приведены для 95% доверительной вероятности. N – количество пар значений, Se – ошибка регрессии. Пометы с и d означают соотношения, полученные, соответственно, для коровых ($h < 40$ км) и глубоких ($h = 250–600$ км) землетрясений региона.

Notes. The regression coefficients are given with confidence level of 95%. N , number of pairs of value; Se , regression error. The marks c and d indicate the relationships obtained for crustal ($h < 40$ km) and deep ($h = 250–600$ km) earthquakes respectively.

Методом обобщенной ортогональной регрессии (GOR) рассчитаны соотношения, связывающие магнитуду коровых ($h \leq 40$ км) землетрясений M_L и энергетические классы K_p и K_c . Это позволяет унифицировать по любой из этих величин магнитуду каталога землетрясений Сахалинского региона. Также получены переходные соотношения к M_L от короткопериодной магнитуды M_{pVA} как для коровых, так и для глубокофокусных ($h = 250\text{--}600$ км) землетрясений. Однако в связи с малым количеством определений M_{pVA} эти зависимости остаются не слишком надежными и нуждаются в уточнении после накопления большего количества данных.

Получено соотношение между M_L и магнитудой Японского метеорологического агентства M_j . Подтверждено для неглубоких землетрясений Сахалина примерное равенство шкал $M_j \approx M_L$ [4]. Для глубокофокусных событий отмечена некоторая недооценка величины M_L относительно M_j .

На основе имеющихся данных удалось показать, что полученные ранее по курильскому каталогу зависимости $M_{LH}(M_L)$ [4] и $M_{LH}(M_j \approx M_L)$ [20] могут послужить временным решением проблемы перехода от упомянутых выше энергетических характеристик землетрясений к магнитудам по поверхностной волне M_S либо M_{LH} , что необходимо для расчета сейсмической энергии по формуле Гутенберга–Рихтера. В качестве альтернативного варианта можно перейти на расчет энергии землетрясений через K_p , хотя в этом случае связать новые данные с оценками энергии землетрясений прошлых лет будет затруднительно.

В дальнейшем предполагается с учетом новых данных провести аналогичную работу по уточнению межмагнитудных зависимостей каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» для Курило-Охотского региона, а также для Приамурья и Приморья. Так как в Курило-Охотском регионе происходит больше сильных землетрясений, это позволит получить устойчивые связи с редко встречающимися в сахалинском каталоге магнитудами M_S , M_{pV} .

Список литературы

1. Droznin D.V., Droznina S.Ya. **2011**. Interactive DIMAS program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, 47(3): 215–224. <https://doi.org/10.3103/S0747923911030054>
2. Чебров В.Н., Гусев А.А., Гусяков В.К., Мишакин В.Н., Поплавский А.А. **2009**. Концепция развития системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России. *Сейсмические приборы*, 45(4): 41–57.
3. Поплавская Л.Н., Бобков А.О., Кузнецова В.Н., Ногорных Т.А., Рудик М.И. **1989**. Принципы формирования и состава алгоритмического обеспечения регионального центра обработки сейсмологических наблюдений (на примере Дальнего Востока). В кн.: *Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР (Методические работы ЕССН)*. М.: Наука, с. 32–50.
4. Safonov D.A., Semenova E.P. **2022**. Regional magnitude M_w in the Russian Far East. *Seismic Instruments*, 58(Suppl 1): S42–S57. <https://doi.org/10.3103/S074792392207009X>
5. Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. **1967**. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой курильских землетрясений. *Физика Земли*, 2: 13–22.
6. Раутиан Т.Г. **1964**. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км. *Экспериментальная сейсмика*. М.: Наука, 88–93. (Труды ИФЗ АН СССР; № 32(199)).
7. *Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР*. **1982**. Отв. сост. Кондорская Н.В., Аранович З.И., Шебалин Н.В. М.: Наука, 273 с.
8. Richter C.F. **1935**. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. of the Seismological Society of America*, 25: 1–32.
9. Маловичко А.А., Петрова Н.В., Габсатарова И.П., Левина В.И., Михайлова Р.С., Курова А.Д. **2023**. Сейсмичность Северной Евразии в 2018–2019 гг. *Землетрясения Северной Евразии*, 26 (2018–2019 гг.): 10–38. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.01>; EDN: ZSVQJD
10. Castellaro S., Mulargia F., Kagan Y.Y. **2006**. Regression problems for magnitudes. *Geophysical Journal International*, 165(3): 913–930. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02955.x>
11. Hall J. **2023**. Linear deming regression. *MATLAB Central File Exchange*. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33484-linear-deming-regression> (accessed October 11, 2023).
12. Сафонов Д.А. **2024**. Переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Курило-Охотского региона. *Вопросы инженерной сейс-*

- мологии, 51(2): 102–117. doi: 10.21455/VIS2024.2-6; EDN: ZHBDUT
13. Fuller W.A. **1987**. *Measurement error models*. New York: John Wiley, 458 p.
 14. Wason H.R., Das R., Sharma M.L. **2018**. Regression relations for magnitude conversion for the Indian Region. In: *Advances in Indian Earthquake Engineering and Seismology*. Springer, Cham, p. 55–66. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76855-7_4
 15. JMA. **2024**. *Japan Meteorological Agency. The Seismological Bulletin of Japan*. URL: https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index_e.html (accessed December 13, 2024).
 16. NIED. **2024**. *National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan*. URL: <http://www.fnet.bosai.go.jp> (accessed December 13, 2024).
 17. Lolli B., Gasperini P., Vannucci G. **2014**. Empirical conversion between teleseismic magnitudes (m_b and M_s) and moment magnitude (M_w) at the Global, Euro-Mediterranean and Italian scale. *Geophysical Journal International*, 199(2): 805–828. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu264>
 18. Волкова Л.Ф., Поплавская Л.Н. **1989**. Региональная шкала MPV(A) для оценки магнитуд дальневосточных землетрясений с нормальной глубиной очага. В кн.: *Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке*. Владивосток, с. 39–40.
 19. Оскорбин Л.С., Волкова Л.Ф. **1978**. Параметры основного толчка и сейсмический режим афтершоков Монеронского землетрясения 5(6) сентября 1971 г. В кн.: *Обработка сейсмологических наблюдений и поиск предвестников землетрясений на Дальнем Востоке*, Южно-Сахалинск, с. 68–87.
 20. Сафонов Д.А. **2025**. Соотношение между магнитудами M_{LH} и M_w для Курило-Охотского региона и его использование для транзитных пересчетов в другие магнитуды. *Вулканология и сейсмология*, 2: 20–37.
 21. Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В. **2023**. Сейсмичность Приамурья и Приморья, Сахалина и Курило-Охотского региона в 2018–2019 гг. *Землетрясения Северной Евразии*, 26 (2018–2019 гг.): 154–170. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.01>
 22. Richter C.F. **1958**. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.
 - developing a seismologic observation system for tsunami warning in the Russian Far East. *Seismic Instruments*, 46: 275–285. <https://doi.org/10.3103/S0747923910030096>
 3. Poplavskaya L.N., Bobkov A.O., Kuznetsova V.N., Nagornyykh T.A., Rudik M.I. **1989**. [Principles of formation and composition of algorithmic support of the regional center for processing seismological observations (using the example of the Far East)]. In: *[Seismological observations in the USSR Far East (Methodological works of the ESSN)]*. Moscow: Nauka, p. 32–50 (In Russ.).
 4. Safonov D.A., Semenova E.P. **2022**. Regional magnitude M_{wa} in the Russian Far East. *Seismic Instruments*, 58(Suppl 1): S42–S57. <https://doi.org/10.3103/S074792392207009X>
 5. Soloviev S.L., Solovieva O.N. **1967**. [Relationship between the energy class and the magnitude of Kuril earthquakes]. *Fizika Zemli*, 2: 13–23. (In Russ.).
 6. Rautian T.G. **1964**. [On determining the energy of earthquakes at distances up to 3000 km]. In: *Eksperimental'naya seismika = Experimental seismic*. Moscow: Nauka, p. 88–93. (Trudy IFZ AN SSSR; № 32(199)). (In Russ.).
 7. *Instruktsiya o poryadke proizvodstva i obrabotki nablyudeniy na seysmicheskikh stantsiyakh Yedinoj sistemy seysmicheskikh nablyudeniy SSSR*. [Instructions on the procedure for making and processing observations at the seismic stations of the Unified Seismic Observation Service (ESSN USSR)]. **1982**. Comp. Kondorskaya N.V., Aranovich Z.I., Shebalin N.V. Moscow: Nauka, 273 p. (In Russ.).
 8. Richter Ch.F. **1935**. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. of the Seismological Society of America*, 25: 1–32. <https://doi.org/10.1785/bssa0250010001>
 9. Malovichko A.A., Petrova N.V., Gabsatarova I.P., Levina V.I., Mikhailova R.S., Kurova A.D. **2023**. [Seismicity of Northern Eurasia in 2018–2019]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii = Seismicity of Northern Eurasia*, 26(2018–2019): 10–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.01>
 10. Castellaro S., Mulargia F., Kagan Y.Y. **2006**. Regression problems for magnitudes. *Geophysical Journal International*, 165(3): 913–930. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02955.x>
 11. Hall J. **2023**. Linear deming regression. *MATLAB Central File Exchange*. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33484-linear-deming-regression> (accessed October 11, 2023).
 12. Safonov D.A. **2024**. Relationships for conversion of energy characteristics of earthquakes in the Kuril-Okhotsk region. *Voprosy inzhenernoj seismologii*, 51(2): 102–117. (In Russ.). doi: 10.21455/VIS2024.2-6

References

- 1 Droznin D.V., Droznina S.Ya. **2011**. Interactive DIMAS program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, 47(3): 215–224. <https://doi.org/10.3103/S0747923911030054>
2. Chebrov V.N., Gusev A.A., Gusakov V.K., Mishatkin V.N., Poplavskiy A.A. **2010**. Concept for

13. Fuller W.A. **1987**. *Measurement error models*. New York: John Wiley, 458 p. <https://doi.org/10.1002/9780470316665>
14. Wason H.R., Das R., Sharma M.L. **2018**. Regression relations for magnitude conversion for the Indian Region. In: *Advances in Indian Earthquake Engineering and Seismology*. Springer, Cham, p. 55–66. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76855-7_4
15. JMA. **2024**. *Japan Meteorological Agency. The Seismological Bulletin of Japan*. URL: https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index_e.html (accessed December 13, 2024).
16. NIED. **2024**. *National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan*. URL: <http://www.fnet.bosai.go.jp> (accessed December 13, 2024).
17. Lolli B., Gasperini P., Vannucci G. **2014**. Empirical conversion between teleseismic magnitudes (m_b and M_s) and moment magnitude (M_w) at the Global, Euro-Mediterranean and Italian scale. *Geophysical Journal International*, 199(2): 805–828. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu264>
18. Volkova L.F., Poplavskaya L.N. **1989**. [Regional MPV(A) scale for estimating magnitudes of the Far Eastern earthquakes with normal focal depth]. In: *Seismology and earthquake-resistant construction in the Far East*. Vladivostok, p. 39–40 (In Russ.).
19. Oskorbin L.S., Volkova L.F. **1978**. [Parameters of the main shock and the seismic regime of the aftershocks of the Moneron earthquake on September 5(6), 1971]. In: *Processing of seismological observations and search for earthquake precursors in the Far East*. Yuzhno-Sakhalinsk, p. 68–87 (In Russ.).
20. Safonov D.A. **2025**. [Relationship between the magnitudes M_{LH} and M_w for the Kuril-Okhotsk region and its use for transit calculations to other magnitudes]. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2: 20–37.
21. Fokina T.A., Safonov D.A., Kostylev D.V. **2023**. Seismicity of the Amur Region and Primorye, Sakhalin and the Kuril-Okhotsk region in 2018–2019. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii = Earthquakes of Northern Eurasia*, 26 (2018–2019): 154–170. doi: 10.35540/1818-6254.2023.26.13
22. Richter C.F. **1958**. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.

Об авторе

Сафонов Дмитрий Александрович (<https://orcid.org/0000-0002-2201-2016>), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, d.safonov@imgg.ru

Поступила 29.12.2024

Принята к публикации 02.02.2025

About the Author

Safonov, Dmitry A. (<https://orcid.org/0000-0002-2201-2016>), Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher of the Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, d.safonov@imgg.ru

Received 29 December 2024

Accepted 2 February 2025