

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



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

УДК 550.34

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.238-255>
<https://www.elibrary.ru/dcgjno>

Динамические параметры очагов землетрясений на острове Сахалин в 1978–2024 гг.

В. Н. Сычев[@], Л. М. Богомолов

^{@E-mail:} koitash@mail.ru

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

Резюме. Получены значения динамических параметров (ДП) для 110 землетрясений с магнитудами $M_w = 4.7–7.7$, произошедших на Сахалине в 1978–2024 гг. Для этих землетрясений ранее был определен скалярный сейсмический момент. Для оценок других ДП: радиусов очагов, сброшенных касательных напряжений и приведенной сейсмической энергии – использовался феноменологический подход, основанный на наличии регрессии, связывающей радиус очага и значения скалярного сейсмического момента для землетрясений на территории Сахалино-Курильского региона. Результаты работы сведены в таблицу данных. Построены карты распределения усредненных значений этих ДП по площади изучаемого региона. Таким образом, значительно увеличен объем данных по сброшенным напряжениям и приведенной сейсмической энергии для сахалинских землетрясений.

Ключевые слова: сейсмичность, землетрясение, каталог, скалярный сейсмический момент, радиус очага, сброс напряжений, остров Сахалин, северо-западная часть Тихого океана

Dynamic parameters of earthquake sources that occurred on Sakhalin Island in 1978–2024

Vladimir N. Sychev[@], Leonid M. Bogomolov

^{@E-mail:} koitash@mail.ru

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

Abstract. The values of dynamic parameters (DP) for 110 earthquakes with magnitudes $M_w = 4.7–7.7$ that occurred on Sakhalin in 1978–2024 were obtained. A scalar seismic moment was previously determined for these earthquakes. To estimate the other DP: the radii of the foci, the shear stress drop, and the reduced seismic energy a phenomenological approach was used based on the presence of regression, which links the source radius and the values of the scalar seismic moment for earthquakes within the Sakhalin-Kuril region. The results of the study were summarized in a data table. Distribution maps of the averaged values of these DP across the studied region were constructed. Thus, the amount of data on the stress drop and reduced seismic energy for Sakhalin earthquakes has been significantly increased.

Keywords: seismicity, earthquake, catalog, scalar seismic moment, source radius, stress drop, Sakhalin Island, North-West of the Pacific

Для цитирования: Сычев В.Н., Богомолов Л.М. Динамические параметры очагов землетрясений на острове Сахалин в 1978–2024 гг. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 3, с. 238–255. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.238-255>; <https://www.elibrary.ru/dcgjno>

For citation: Sychev V.N., Bogomolov L.M. Dynamic parameters of earthquake sources that occurred on Sakhalin Island in 1978–2024. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 3, pp. 238–255. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.238-255>

Финансирование и благодарности

Работа проведена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ 075-00604-25). При выполнении работы использовались данные, полученные 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/>; <http://www.gsras.ru/unu/>).

Введение

Остров Сахалин и Курильские острова – дальневосточные российские регионы с высоким уровнем сейсмической активности [1–4]. Развитию методов мониторинга напряженно-деформированного состояния геологической среды в Дальневосточном регионе и оценкам вероятности сильного землетрясения (прогнозу) посвящено множество работ, например [2, 4–7]. Тем не менее, совершенствование методов оценки сейсмической опасности в Дальневосточном регионе остается актуальным. Информация о динамических параметрах (ДП) очагов землетрясений: радиусе очага, скалярном сейсмическом моменте M_0 , сброшенных касательных напряжениях $\Delta\sigma$, приведенной сейсмической энергии – может характеризовать региональные особенности деформационного процесса и, таким образом, быть востребована в исследованиях, направленных на возможность предсказания сильных землетрясений. К примеру, временные вариации среднего уровня $\Delta\sigma$ для выборок событий заданных магнитуд являются признаком изменения напряженного состояния земной коры по диаграмме Кулона–Мора.

Для северо-западной части Тихого океана, как и для многих других регионов, значения параметра M_0 определялись регулярно, вместе с восстановлением тензора сейсмического момента. Они представлены на сайте СМТ (Centroid Moment Tensor) (Global CMT Catalog Search; <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>). А вот другие ДП для землетрясений в этом регионе и, в частности, на Сахалине исследовались в значительно меньшей степе-

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (No. 075-00604-25). To carry out the study, we used data obtained at the unique scientific installation “Seismic Infrasound Monitoring Complex of the Arctic Cryolithozone and the complex of continuous seismic monitoring of the Russian Federation, adjacent territories and the world” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>; <http://www.gsras.ru/unu/>).

ни. В оригинальной работе [8] представлены данные по всем спектральным (включая предельную спектральную плотность Ω_0 и угловую частоту f_0) и динамическим параметрам очагов 431 землетрясения в северо-западной части Тихого океана, которые произошли в период 1969–1996 гг. Фактически был составлен каталог ДП (автор Р.Н. Бурымская), который до настоящего времени остается наибольшим по числу определений сброшенных напряжений $\Delta\sigma$ в Дальневосточном регионе. Значения $\Delta\sigma$, рассчитанные для модели разрыва очага по Брюну [9, 10], составляют $0.1 \text{ МПа} < \Delta\sigma < 85 \text{ МПа}$. Каталог также содержит значения моментной магнитуды M_w , которые находятся в пределах $4.1 < M_w < 8.7$.

Эпицентральные положения землетрясений из каталога Бурымской представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, подавляющее большинство очагов расположены в зоне вокруг Курильских о-вов, на территорию о. Сахалин попадают всего 8 событий из 431. Это обусловлено расположением Курильских о-вов и наклонной сейсмофокальной зоны мощностью около 70 км [10] (ближней окрестности области субдукции Тихоокеанской плиты). Здесь концентрируются очаги землетрясений и достигается почти максимальная сейсмическая активность на планете. Согласно материалам ежегодников «Землетрясения России» за 2003–2023 гг. (<http://www.gsras.ru/zr/contents.html>), среднее количество тектонических землетрясений с магнитудами $M_w > 1.3$, регистрируемых под акваторией у Южных Курильских о-вов, составляет 2–3 тыс. событий в год. На Сахалине сейсмическая активность носит умеренный характер, она сосредоточена главным образом в земной коре на глубинах 10–30 км.

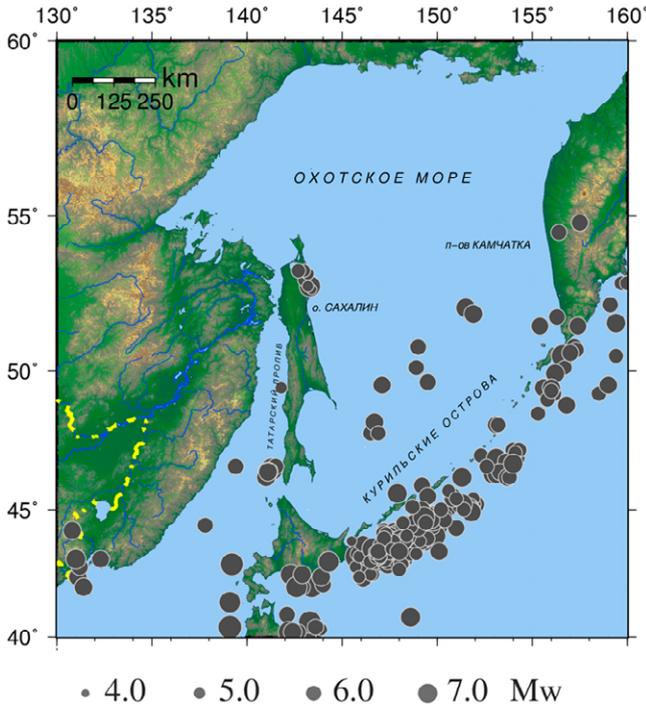


Рис. 1. Расположение эпицентров землетрясений 1969–1996 гг. для которых в [8] были определены спектральные и динамические параметры по записям аналоговых (частотно-избирательных) сейсмостанций.

Fig. 1. Location of epicenters of earthquakes that occurred in 1969–1996, for which spectral and dynamic parameters were determined in [8] based on the records of analog (frequency-selective) seismic stations.

В недавней работе [11] из каталога Бурымской было выделено 264 события в компактном районе Южных Курильских островов и для этой выборки установлено наличие регрессий, связывающих значения радиуса очага r , сброшенных напряжений $\Delta\sigma$ и приведенной сейсмической энергии e_{PR} со значениями сейсмического момента M_0 . Для зависимости $r(M_0)$ отмечен более высокий коэффициент корреляции, чем для других регрессий.

Как продолжение подхода [11] к анализу регрессионных соотношений в данной работе рассматривается возможность их использования для феноменологических оценок сброса напряжений и приведенной сейсмической энергии для землетрясений на о. Сахалин. Целью является создание (расширение) банка данных по динамическим параметрам (в особенности по сброшенным напряжениям и приведенной сейсмической энергии) очагов землетрясений на о. Сахалин и окружающей акватории Охотского и Японского морей

на основе данных о 110 землетрясениях с известным сейсмическим моментом, произошедших в период 1978–2024 гг. Такие оценки ДП могут представлять интерес, поскольку в работах по сейсмичности Сахалина в начале XXI в. (т.е. в последнее 25-летие) внимание было сконцентрировано на кинематических (фокальных), но не динамических параметрах очагов [12, 13].

Методика

Сброшенные напряжения, согласно [9, 10, 14], вычисляются с помощью выражения

$$\Delta\sigma = 7M_0/16r^3. \quad (1)$$

Согласно модели разрыва в очаге [15], величина приведенной сейсмической энергии, т.е. отношения излученной сейсмической энергии E_S к сейсмическому моменту M_0 , также пропорциональна отношению M_0/r^3 и, значит, пропорциональна $\Delta\sigma$. Коэффициент пропорциональности между параметрами e_{PR} и $\Delta\sigma$ зависит только от свойств среды и модели разрыва очага. Для пересчета значений $\Delta\sigma$ на приведенную сейсмическую энергию можно использовать выражение [11]:

$$e_{PR} = (32k^3/7)\Delta\sigma/G \quad (2)$$

где G – средний модуль сдвига, k – коэффициент, зависящий от модели разрыва.

Другая форма выражения для e_{PR} приведена в монографии [16]:

$$e_{PR} = 0.2 \Delta\sigma/\rho V_S^2, \quad (3)$$

где ρ – плотность, V_S – скорость поперечных волн.

Используя соотношение $G = \rho V_S^2$, можно показать, что выражения (2) и (3) эквивалентны [11].

Значения скалярного сейсмического момента M_0 для событий в исследуемом регионе можно получить с сайта СМТ (<https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>). При отсутствии экспериментальных данных о радиусах очагов для вычислений $\Delta\sigma$ по формуле (1) можно использовать модельную зависимость радиуса очага от магнитуды $r(M_w)$, например, из хрестоматийной работы Ю.В. Ризниченко

[17]. Все модельные зависимости далее будут приведены в системе измерений СИ.

Как известно, моментная магнитуда M_w связана линейной зависимостью с логарифмом скалярного сейсмического момента (формула Канамори [18]):

$$M_w = 2/3 (\lg(M_0) - 9.1), \quad (4)$$

так что правая часть (1) может быть выражена как функция M_0 . В качестве другой модели $r(M_0)$ для очагов землетрясений в рассматриваемом регионе можно использовать регрессию, основанную на данных [8]. Согласно [17], выражение для радиуса очага (рассчитанного по модели Брюна) записывается в форме

$$\lg(r) = 0.4M_w + 1.5 = 0.27 \lg(M_0) - 0.92. \quad (5)$$

По данным о значениях r , M_0 , M_w для землетрясений из каталога [8] находим следующие регрессионные зависимости для всего каталога.

$$\lg(r) = 0.36M_w + 1.78 = 0.24 \lg(M_0) - 0.4. \quad (6)$$

На рис. 2 показаны графики для обеих модельных зависимостей (шкала радиусов логарифмическая). Также показан разброс значений r (радиуса Брюна [9, 10]) по каталогу Буримской.

Как видно из рис. 2, зависимости $r(M_w)$, полученные по разным источникам, дают близкие значения радиусов очага в диапазоне магнитуд $4.5 \leq M_w \leq 8.5$, куда попадает подавляющее большинство событий из каталога [8]. Для событий с $M_w \leq 6.7$ регрессия (6), основанная на экспериментальных данных, дает для очагов несколько большие значения $r(M_w)$ по сравнению с аппроксимацией (5). Для диапазона магнитуд $M_w > 6.7$ соотношение оценок $r(M_w)$ обратное. Наибольшее различие между значениями $\lg r$ (около 20 %) имеет место для наименьших магнитуд $M_w \sim 4.5$

В настоящей работе эмпирическая регрессия (6) используется для оценок радиуса очага и последующих оценок $\Delta\sigma$ и e_{PR} , теоретическая аппроксимация (5) – для оценок возможной погрешности в значениях этих параметров.

Регрессионная зависимость (6) позволяет получить оценку радиуса очага для модели

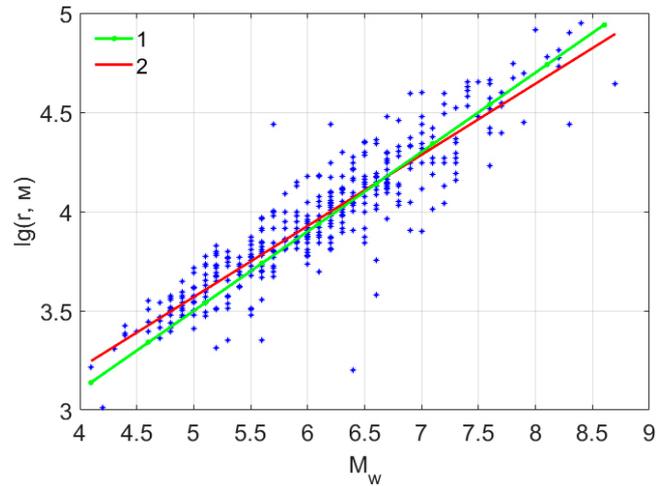


Рис. 2. Модельные зависимости $\lg(r(M_w))$: 1 – теоретическая, согласно обобщению [17], 2 – эмпирическая, по каталогу ДП [8]. Значения радиусов очагов определены по модели Брюна.

Fig. 2. Model dependences $\lg(r(M_w))$: 1, theoretical, according to the summary book [17], 2, empirical, according to the DP catalog [8]. The values of the source radii have been determined by the Brune model.

Брюна [9, 10], так как именно для этой модели разрыва, наиболее распространенной в работах 1980–1990-х годов, в [8] представлены данные о так называемых радиусах Брюна. В работах XXI в. были предложены альтернативные модели разрыва в очаге.

При сравнении значений радиусов очагов по Брюну, рассчитанных через параметр угловой частоты f_0 [9, 14], с наблюдениями косейсмических разрывов, выходящих на дневную поверхность, было установлено, что модель Брюна дает завышенные оценки r [19]. Вследствие этого и обратно пропорциональной зависимости $\Delta\sigma$ от r^3 в формуле (1), оценки сброшенных напряжений могут оказаться в разы ниже реальных значений. Поясним выбор модели разрыва, позволяющей уточнить оценку радиуса очага (6).

В модели Брюна область очага сферическая с радиусом r_B , а смещение происходит одновременно по всей экваториальной плоскости (поверхности разрыва). Модель предполагает, что высокочастотные гармоники сейсмических волн сразу возбуждаются всем круговым разрывом, а не начальным малым участком. Из-за этого и получаются завышенные оценки радиуса $r = r_B$ для данного значения параметра f_0 , характеризующего высокочастотную часть

спектра сейсмических волн. При использовании модели Брюна значение коэффициента k в выражении (2) $k = 0.37$ [11].

В модели Мадариаги [15, 20] в качестве очага предлагается рассматривать растущую с конечной скоростью V_R дисковую трещину, которая останавливается, когда ее радиус достигает максимального значения, называемого радиусом разрушения r_M . Скорость роста трещины заведомо меньше скорости поперечных волн V_S , ее характерные значения $V_R \sim (0.7-0.9) V_S$ [21]. Очаг считается цилиндрически симметричным, а его радиус можно отождествить с величиной r_M . В этой модели выражение, связывающее радиус очага и угловую частоту f_0 , зависит от скорости разрыва V_R , которая остается неопределенным параметром.

В работе [22] приняты во внимание эффекты сцепления (cohesion), существенные для роста трещины такой же формы, как в модели Мадариаги, что позволило уточнить эту модель. Усовершенствованная модель получила название модели Мадариаги–Канеко–Ширера (МКШ). В рамках этой модели показано, что при скорости расширения трещины $V_R \sim 0.9V_S$ величина радиуса очага при фиксированном f_0 получается равной примерно $0.7 r_B$ (радиуса для модели Брюна). При изменении скорости V_R в пределах $(0.75-0.9) V_S$ эта оценка меняется незначительно в пределах 15%. Для модели МКШ коэффициент k в формуле (2) равен 0.26, что как раз соответствует соотношению радиусов $r_M \approx 0.7 r_B$. Выбрав модель МКШ, будем пересчитывать «брюновский» радиус, определяемый выражением (6), в радиус для этой модели. При логарифмической записи для перехода к радиусу по модели МКШ достаточно из (5) вычесть поправку $\delta r = |\lg 0.7| = 0.155$.

Исходные данные

Каталог землетрясений, для которых рассчитаны компоненты тензора сейсмического момента, представлен на сайте Global CMT Catalog Search (<https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>). Каталог содержит также значения скалярного сейсмического момента M_0 и

моментной магнитуды M_w для сейсмических событий различных регионов Земли. Для территории о. Сахалин и сопредельных акваторий Охотского и Японского морей из этого источника получены данные для 110 землетрясений с 1978 по 2024 г. На рис. 3 представлено расположение эпицентров этих событий.

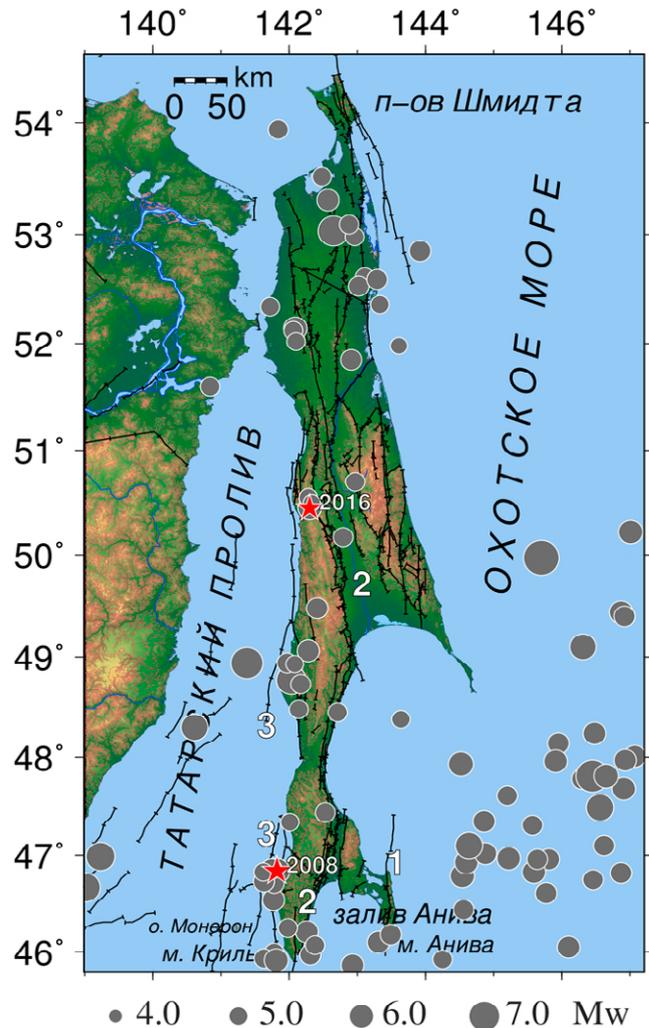


Рис. 3. Распределение эпицентров 110 землетрясений за 1978–2024 гг. по площади изучаемого региона, согласно каталогу СМТ (<https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>). Красными звездочками обозначены землетрясения: 2008 – Невельское (2007.08.02, $M_w = 6.3$), 2016 – Онорское (2016.08.14, $M_w = 5.8$). Черными линиями показаны крупнейшие разломы и разломные зоны [23]: 1 – Восточно-Сахалинский (Хоккайдо-Сахалинский) разлом, 2 – Центральнo-Сахалинская, 3 – Западно-Сахалинская разломная зона.

Fig. 3. Distribution of the epicenters of 110 earthquakes in 1978–2024 over the studied region, according to the SMT catalog (<https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>). Red stars indicate earthquakes: 2008, Nevelskoye (2007.08.02, $M_w = 6.3$); 2016, Onorskoye (2016.08.14, $M_w = 5.8$). Black lines show the largest faults and fault zones, according to [23]: 1, East Sakhalin (Hokkaido-Sakhalin) fault; 2, Central Sakhalin fault zone; 3, West Sakhalin fault zone.

Рис. 3 демонстрирует, что очаги землетрясений на территории Сахалина и прилегающего шельфа приурочены к Западно-Сахалинской и Центрально-Сахалинской разломным зонам, а также к Восточно-Сахалинскому разлому. Такое распределение по площади характерно для событий региональной сейсмичности с магнитудами выше 4.0 [3]. Некоторые количественные характеристики для рассматриваемой выборки из 110 событий (распределение по магнитудам, времени и глубине) представлены на рис. 4. Магнитуда событий находится в пределах $4.7 < M_w < 7.7$, причем сильные события с магнитудой $M_w > 6.0$ составляют 16 % (18 событий). По времени с 1978 по 2024 г. события распределены более или менее равномерно. Распределение по глубине подчеркивает особенности сейсмофокальной зоны в северо-западной части Тихого океана, отмеченные, в частности, в [3].

Глубокофокусные землетрясения происходят преимущественно в районе Охотского моря и сосредоточены в основном в наклонной сейсмофокальной зоне (СФЗ) мощностью около 70 км, простирающейся под материк до глубин около 650 км [3]. Глубина гипоцентров землетрясений, произошедших на Сахалине или прилегающем шельфе, как правило, не превышает 60 км. Учитывая эти особенности глубинного распределения землетрясений, разделим нашу выборку на две части: 48 событий с глубиной гипоцентров менее 60 км и 62 события с гипоцентрами на глубине более 60 км. Распределение ДП удобно рассматривать для этих выборок по отдельности.

Результаты

Результаты расчета динамических параметров 110 землетрясений: радиусов землетрясений по моделям Брюна и Мадариаги–Канеко–Ширера, сброшенных напряжений (для модели МКШ), а также приведенной сейсмической энергии приведены в Приложении. Наряду с этим в Приложении представлена информация о гипоцентрах и величинах скалярного сейсмического момента для этих землетрясений. Полученные значения сброшенных напряжений лежат в пределах $0.7 < \Delta\sigma < 13.5$ МПа, а значения e_{PR} порядка 10^{-4} и лежат в пределах $3 \cdot 10^{-4} < e_{PR} < 5 \cdot 10^{-3}$.

На рис. 5 представлено расположение эпицентров для двух групп землетрясений из каталога СМТ, для которых с помощью выражений (1), (2), (6) были оценены динамические параметры: для событий с очагами на глубине до 60 км и более 60 км.

Ввиду пропорциональности приведенной сейсмической энергии и сброса напряжений, разноцветные значки на рис. 5 характеризуют также и значения e_{PR} по месту расположения эпицентров рассматриваемых событий.

Значения параметров $\Delta\sigma$ и e_{PR} сами по себе относятся к области очага, т.е. к весьма малому объему среды. Поэтому представляет интерес усреднение этих параметров по выборке событий, сформированной по какому-либо признаку (например, по расположению гипоцентров в заданной зоне или одинаковому типу подвижки в очаге). Это, в частности, позволит сопоставить распределение сброшенных

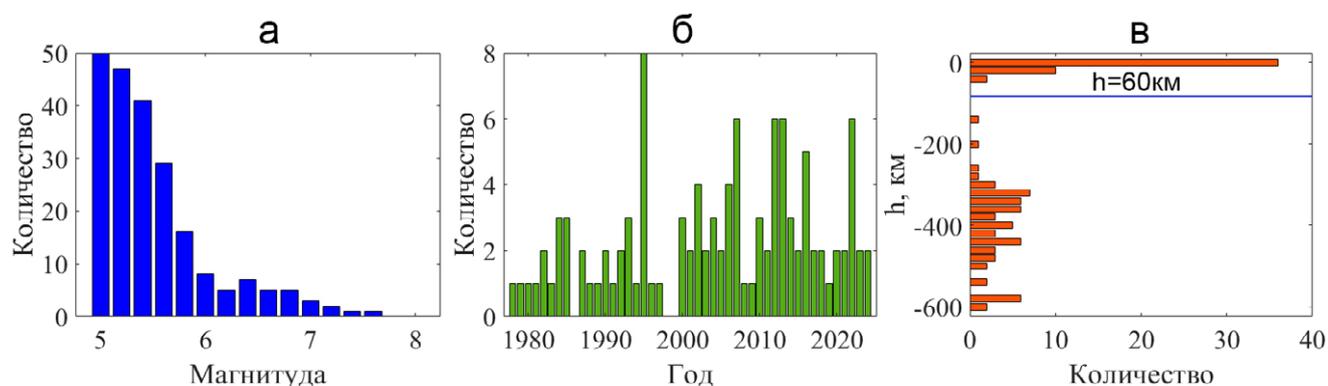


Рис. 4. Распределение 110 землетрясений из каталога СМТ: а – по магнитудам, б – во времени и в – по глубине.

Fig. 4. Distribution of 110 earthquakes from the CMT catalog: a, by magnitudes; б, in time; в, by depth.

напряжений с геодинамической обстановкой и геологическими структурами (которые при необходимости картируются с усреднением по большой площади). Поскольку для очага радиуса r снятие касательных напряжений происходит в объеме порядка r^3 , естественно использовать при усреднении $\Delta\sigma$ средневзвешенное по объему значение этого параметра. В качестве весового множителя для i -го очага можно использовать величину r_i^3 (пропорциональную его объему). Тогда средневзвешенное значение сброшенных напряжений $\langle \Delta\sigma \rangle_V$ будет определяться выражением:

$$\langle \Delta\sigma \rangle_V = \frac{\sum_i \Delta\sigma_i r_i^3}{\sum_i r_i^3} \quad (7)$$

Но так как произведение $\Delta\sigma_i \cdot r_i^3 = 7/16 (M_0)_i$, то для средневзвешенного (усредненного по объему) значения сброшенных напряжений получается удобная расчетная формула:

$$\langle \Delta\sigma \rangle_V = \frac{7}{16} \frac{\sum_i (M_0)_i}{\sum_i r_i^3} \quad (8)$$

Стоит отметить, что переход от индивидуальных значений $\Delta\sigma$ к средневзвешенным аналогичен усреднению при переходе от параметров механизма отдельных очагов к параметрам сеймотектонической деформации [24, 25]. Естественно, что весовые множители для этих случаев различаются.

Используя выражение (8) и регрессию (6), связывающую радиус i -го очага с соответствующим

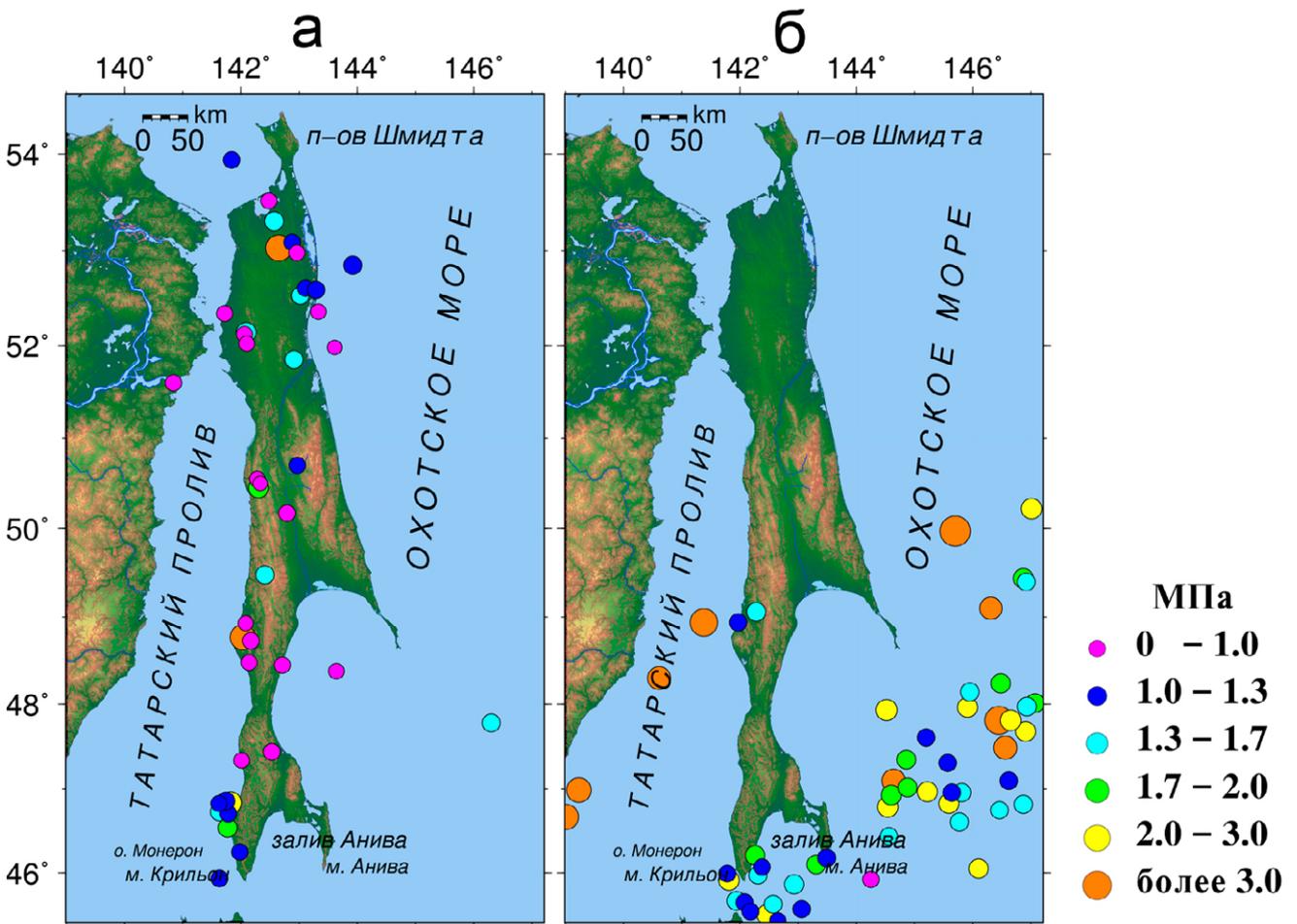


Рис. 5. Эпизентральное положение землетрясений, для которых определены значения сброшенных напряжений и других ДП: а – с глубиной гипоцентров до 60 км, б – с глубиной гипоцентров более 60 км. Радиус круга – значка землетрясения пропорционален величине магнитуды, а цвет указывает величину сброса напряжения МПа. В легенде указаны значения сброшенных напряжений, рассчитанные для модели МКШ.

Fig. 5. The epicentral position of earthquakes for which the values of the stress drop and other DP were determined: a, with a depth of hypocenters up to 60 km; б, with a depth of hypocenters more than 60 km. The radius of the earthquake circle icon is proportional to the magnitude, and the color indicates the magnitude of the stress drop, MPa. The legend shows the values of the stress drop calculated for the Madariagi–Kaneko–Shearer model.

ющим ему значением сейсмического момента M_0 , построим распределение по площади средневзвешенных по объему сброшенных напряжений. Расчеты проведены для ячеек размером $1 \times 1^\circ$, при этом сдвиг также задавался в 1° . Для отображения результатов использовалась программа *nearneighbor* пакета GMT (The Generic Mapping Tools; <https://www.generic-mapping-tools.org/>), в которой реализован алгоритм ближайшего соседа для присвоения среднего значения каждому узлу, который имеет одну или несколько точек в пределах заданного радиуса от узла. В этом программном пакете узел считается центром эллиптической (круговой) зоны, на которую распространяется вычисленное среднее значение. На рис. 6 показано площадное распределение логарифмических значений средневзвешенных сброшенных напряжений по территории для событий на-

ших двух выборок: с глубиной гипоцентров до 60 км и более 60 км. Номер на рисунке соответствует номеру строки в табл. 1, где приведены координаты ячейки, значение средневзвешенного сброшенного напряжения и количество событий, по которым это сброшенное напряжение определено.

По рис. 6 а видно, что для неглубоких землетрясений зоны с наибольшими значениями средневзвешенных сброшенных напряжений расположены в районе Пояска ($\sim 48^\circ$ с.ш.) и на широте г. Ноглики ($\sim 52^\circ$ с.ш.). На юге Сахалина в районе около Западно-Сахалинской разломной зоны, где сейсмическая активность максимальна (выше только на Курильских о-вах, по данным ежегодников «Землетрясения России»; <http://www.gsras.ru/zr/contents.html>), значения средневзвешенных сброшенных напряжений менее 3 МПа. Наиболее

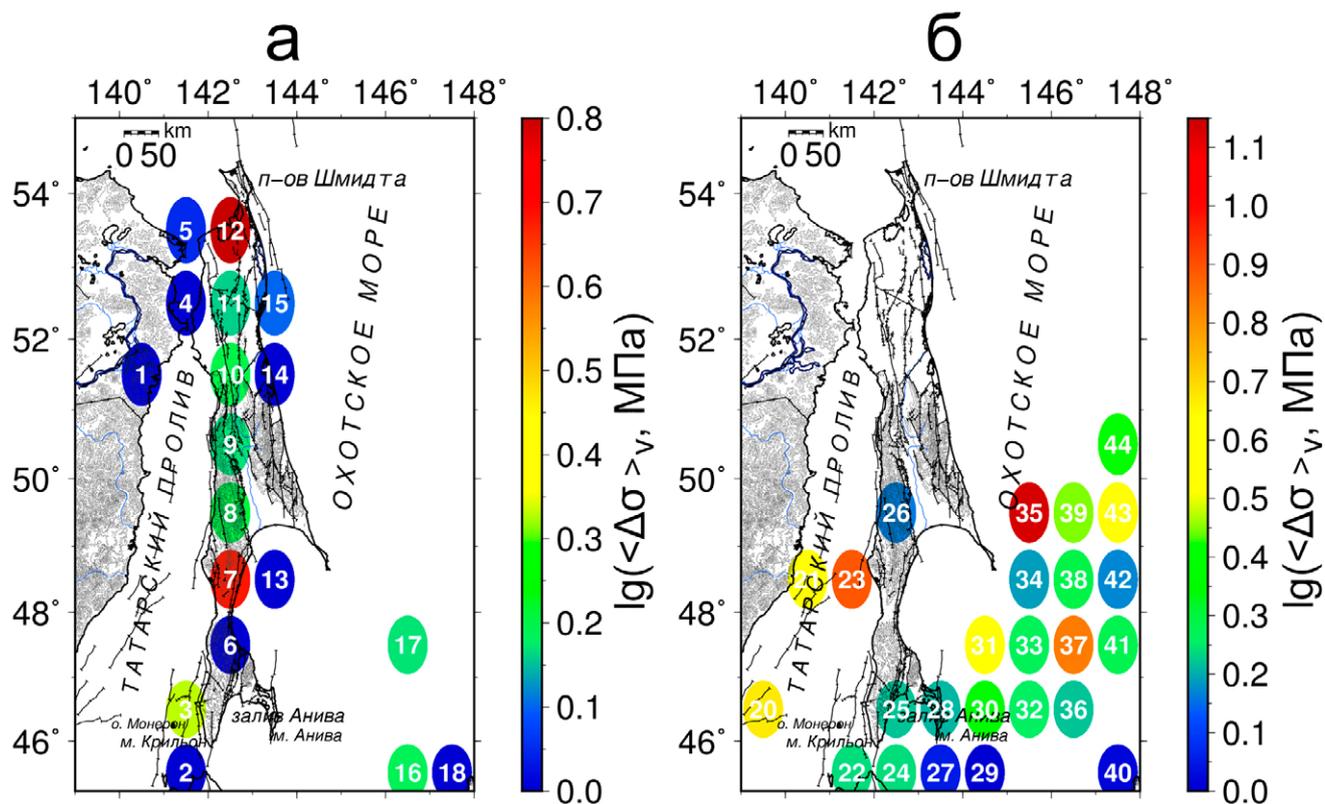


Рис. 6. Распределение логарифмических значений средневзвешенных сброшенных напряжений по площади о. Сахалин и окружающих морей: (а) очаги землетрясений находятся на глубине до 60 км, (б) на глубине более 60 км. Номер в эллипсе соответствует номеру записи в табл. 1. Цвет ячейки соответствует логарифму величины усредненных сброшенных напряжений (логарифмический масштаб позволяет более контрастно выделить ячейки с минимальным значением сброшенных напряжений).

Fig. 6. Distribution of the logarithmic values of weighted average stress drop over the area of Sakhalin Island and surrounding seas: (a), earthquake sources at depths up to 60 km; (б), earthquake sources at depths of more than 60 km. The number in the ellipse corresponds to the number of the entry in Table 1. The color of the ellipse corresponds to the logarithmic value of the averaged stress drop (the logarithmic scale promotes a clearer differentiation of ellipses with a minimum value of the stress drop).

Таблица 1. Рассчитанные значения средневзвешенных сброшенных напряжений**Table 1.** Calculated values of weighted average stress drop

№	φ, °N	λ, °E	$\langle \Delta\sigma \rangle_v$ МПа	Σn_i
<i>Глубина < 60 км</i>				
1	51.5	140.5	0.9	1
2	45.5	141.5	1.0	2
3	46.5	141.5	2.1	8
4	52.5	141.5	0.8	1
5	53.5	141.5	1.1	1
6	47.5	142.5	0.9	2
7	48.5	142.5	4.8	5
8	49.5	142.5	1.6	1
9	50.5	142.5	1.5	5
10	51.5	142.5	1.6	1
11	52.5	142.5	1.5	4
12	53.5	142.5	6.6	4
13	48.5	143.5	0.8	1
14	51.5	143.5	0.7	1
15	52.5	143.5	1.3	5
16	45.5	146.5	1.6	1
17	47.5	146.5	1.5	1
18	45.5	147.5	0.9	2
<i>Глубина > 60 км</i>				
19	47.5	138.5	1.9	1
20	46.5	139.5	4.7	2
21	48.5	140.5	3.6	1
22	45.5	141.5	1.8	3
23	48.5	141.5	7.8	2
24	45.5	142.5	1.7	7
25	46.5	142.5	1.7	2
26	49.5	142.5	1.5	1
27	45.5	143.5	1.1	1
28	46.5	143.5	1.6	2
29	45.5	144.5	1.0	1
30	46.5	144.5	2.3	3
31	47.5	144.5	3.8	4
32	46.5	145.5	1.8	5
33	47.5	145.5	1.9	3
34	48.5	145.5	1.5	1
35	49.5	145.5	13.5	1
36	46.5	146.5	1.7	3
37	47.5	146.5	7.0	6
38	48.5	146.5	1.9	1
39	49.5	146.5	2.8	3
40	45.5	147.5	1.0	1
41	47.5	147.5	1.9	1
42	48.5	147.5	1.5	3
43	49.5	147.5	4.3	2
44	50.5	147.5	2.6	1

Примечание. φ и λ – широта и долгота узловой точки, $\langle \Delta\sigma \rangle_v$ – средневзвешенное сброшенное напряжение, Σn_i – количество событий в ячейке (см. рис. 6).

Note. φ and λ, latitude and longitude of node point; $\langle \Delta\sigma \rangle_v$ values of weighted average stress drop; Σn_i , the number of events in the ellipse (see Fig. 6).

низкие значения $\langle \Delta\sigma \rangle_v \sim 1.2$ МПа характерны для событий на юге Сахалина около Центрально-Сахалинской разломной зоны и в северной части Татарского пролива. Для глубокофокусных землетрясений в Охотском море выделяются зоны с наиболее высокими значениями $\langle \Delta\sigma \rangle_v$, превышающими 6 МПа. Одна из них расположена на 47° с.ш., 146° в.д.

В работах [26, 27] построены карты-схемы районирования о. Сахалин по типу геодинамической обстановки. Карты составлены на основе обработки полевых материалов по индикаторам напряженного состояния среды и космоснимков с проявлением разломов в рельефе. Выделено три режима: одноосное сжатие, одноосное (горизонтальное) растяжение и трехосное напряженное состояние. Для сопоставления распределения геодинамических обстановок и средневзвешенного сброса напряжений будем использовать оценки, полученные для выборки землетрясений с глубиной гипоцентров до 60 км. На рис. 7 показано расположение зон с различными значениями $\langle \Delta\sigma \rangle_v$ на карте геодинамических обстановок, приведенной в [27].

Одна из двух зон с наибольшим значением сброса усредненных напряжений располагается по месту узкой части острова и охватывает геологические структуры перешейка Поясок. Эта зона попадает на граничащие друг с другом районы с обстановками преобладающего одноосного сжатия (ее северная часть) и преобладающего одноосного растяжения (южная часть). Другая зона с наибольшим значением $\langle \Delta\sigma \rangle_v$, с центром у 53.5° с.ш., охватывает сопредельные районы с обстановками трехосного напряженного состояния и преобладающего одноосного растяжения. Зоны с наименьшим значением $\langle \Delta\sigma \rangle_v$ в южной части о. Сахалин перекрывают сегменты Центрально-Сахалинской разломной зоны, а на севере попадают на Татарский пролив и северо-западное побережье о. Сахалин. Согласно рис. 7, очаги наиболее сильных землетрясений, произошедших на о. Сахалин в XXI в.: Невельского 02.08.2007, $M_w = 6.2$, и Онорского 14.08.2016, $M_w = 5.8$, оказались лежащими внутри зон с небольшими значени-

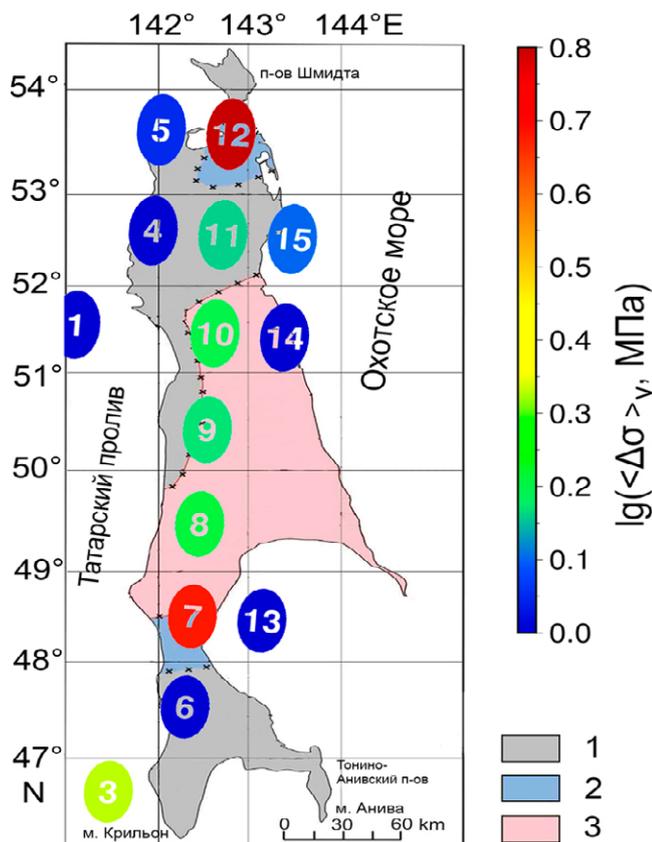


Рис. 7. Схема районирования территории о. Сахалин по типу геодинамической обстановки, согласно [26, 27], и расположение зон с различным средневзвешенным сбросом напряжений в районах с обстановкой трехосного напряженного состояния (1), преобладающего одноосного растяжения (2) и преобладающего одноосного сжатия (3). Цвет эллипса и число внутри эллипса означают то же, что на рис. 6.

Fig. 7. The zoning map of Sakhalin Island based on the type of geodynamic regime, according to [26, 27], and the location of zones with different weighted average stress drop in areas with modes: areas with triaxial stress (1), areas with predominant uniaxial tension (2), and areas with predominant uniaxial compression (3). The color of the ellipse and the number inside the ellipse mean the same as in Fig. 6.

ями средневзвешенных сброшенных напряжений, $\langle \Delta\sigma \rangle_v \sim 3$ МПа, по сравнению с максимумами в «красных зонах». Тем не менее значения $\langle \Delta\sigma \rangle_v$ для этих двух «зеленых» зон примерно втрое больше, чем для зон с минимальными средневзвешенными напряжениями.

В зонах с геодинамическими обстановками преобладающего одноосного сжатия и трехосного напряженного состояния, занимающих наибольшую площадь о. Сахалин (рис. 7), лежат очаги землетрясений с разными типами подвижек (или, другими словами, с разными фокальными механизмами землетрясений). Представляет интерес, наряду с площадным распределением $\langle \Delta\sigma \rangle_v$, сопоставить средневзвешенные сброшенные напряжения для выборок событий с одинаковыми типами подвижек. Для этого также можно использовать информацию из каталогов СМТ, содержащих данные об углах падения осей сжатия Ppl и растяжения Tpl . По значениям углов падения (углов между этими осями и горизонтальной плоскостью) можно определить тип подвижки [24, 25]. В табл. 2 представлено количество очагов с разными типами подвижек для рассматриваемой выборки в 110 землетрясений из каталога СМТ. Также приведены диапазоны значений углов Ppl и Tpl , по которым определялся тип подвижки каждого очага. Согласно табл. 2, среди очагов землетрясений на глубинах до 60 км преобладают взбросы (45 %) и взбросо-сдвиги (10 %). Этот результат согласуется со схемой районирования

Таблица 2. Распределение землетрясений в зависимости от типа подвижки в очаге

Table 2. Distribution of earthquakes according to the type of focal shift

Параметр	Тип подвижки (фокальный механизм)					
	Взброс	Сброс	Горизонтальный сдвиг	Взбросо-сдвиг	Сбросо-сдвиг	Взрез
Угол падения оси Р	$Ppl < 30^\circ$	$Ppl > 60^\circ$	$Ppl < 30^\circ$	$Ppl < 30^\circ$	$30 \leq Ppl \leq 60$	$30 \leq Ppl \leq 60$
Угол падения оси Т	$Tpl > 60^\circ$	$Tpl < 30^\circ$	$Tpl < 30^\circ$	$30 \leq Tpl \leq 60$	$Tpl < 30^\circ$	$30 \leq Tpl \leq 60$
Все события 110 (100)	50 (45)	–	8 (7)	25 (23)	8 (7)	19 (17)
Глубина < 60 км 48 (100)	38 (79)	–	2 (4)	5 (10)	1 (2)	2 (4)
Глубина > 60 км 62 (100)	12 (19)	–	6 (10)	20 (32)	7 (11)	17 (27)

Примечание. В скобках указано процентное соотношение количества землетрясений с разным типом подвижки в очаге.
Note. The percentage of earthquakes with different types of focal shift is indicated in parentheses.

территории о. Сахалин по типу геодинамической обстановки (рис. 7), составленной в [26, 27] на основе геологических индикаторов напряженного состояния среды. На глубинах более 60 км наибольшая доля приходится на взбросо-сдвиги (32 %) и взрезы (27 %).

Средневзвешенные значения сброшенных напряжений для разных типов подвижек рассчитывались по формуле (7) с суммированием по выборкам однотипных землетрясений, раздельно для глубин гипоцентров менее и более 60 км. Результат расчетов показан на рис. 8.

Для очагов, лежащих на глубинах до 60 км, наибольшие значения средневзвешенных сброшенных напряжений свойственны подвижкам типа «горизонтальный сдвиг», а наименьшие – сбросо-сдвигам и взбросо-сдвигам (рис. 8 а). Поскольку максимальное и минимальное значения $\langle \Delta\sigma \rangle_v$ различаются в ~6 раз, этот результат значим, несмотря на небольшую статистику событий. На глубинах более 60 км средневзвешенное значение сброшенных напряжений оказалось наибольшим для очагов типа взброс, а наименьшим – для типа горизонтальный сдвиг, причем различие также шестикратное. На этих глубинах для очагов с подвижками типа взрез и сбросо-сдвиг значения $\langle \Delta\sigma \rangle_v$ намного больше минимального.

С помощью выражения (3) проведены оценки приведенной сейсмической энергии для 48 землетрясений, которые произошли на глубинах до 60 км. Значения сброшенных напряжений взяты из табл. 1. Для параметров среды приняты следующие характерные значения: $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$, согласно [28]; $V_s = 430 \text{ м/с}$ [29, 30].

Для землетрясений с глубинами гипоцентров более 60 км оценки e_{PR} не проводились из-за значительного различия плотности и скорости упругих волн на разных расстояниях от наклонной сейсмофокальной зоны. На рис. 9 показана зависимость приведенной сейсмической энергии от моментной магнитуды землетрясений с очагами на глубинах до 60 км. Диапазон изменения e_{PR} составляет от 10^{-5} до 10^{-3} , что соответствует данным для «нормальных» тектонических землетрясений в других регионах [11, 16, 31]. Полученные значения e_{PR} в этом диапазоне согласуются также с представлениями об излучении сейсмической энергии при динамических разрывах [16].

Стоит отметить, что из выражений (1), (3), (6) и формулы Канамори (4) вытекает наличие линейной регрессии между значениями приведенной сейсмической энергии и моментной магнитуды. Рис. 9 показывает, что во всем диапазоне магнитуд $4.7 < M_w < 7.0$ разброс точек $\lg e_{PR}$ незначительный, а коэффициент

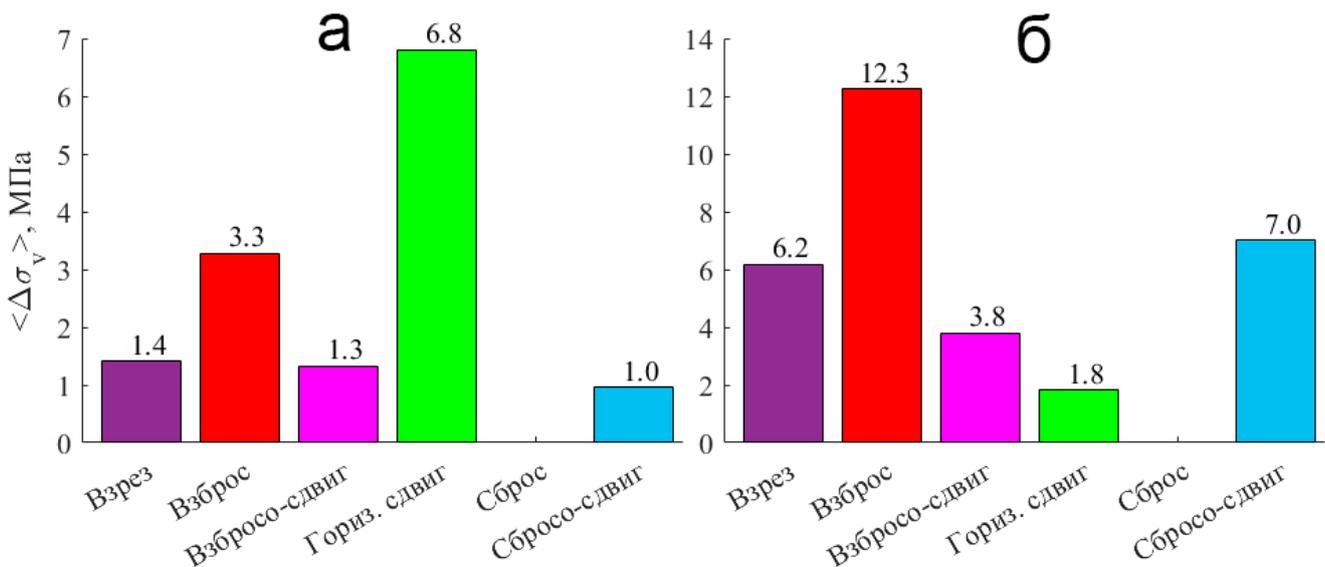


Рис. 8. Средневзвешенные сброшенные напряжения для землетрясений с разными типами очаговых подвижек: (а) очаги на глубине 60 км, (б) очаги на глубине более 60 км.

Fig. 8. Weighted average stress drop for earthquakes with different types of focal shift: (a) source depth up to 60 km; (b) source depth of more than 60 km.

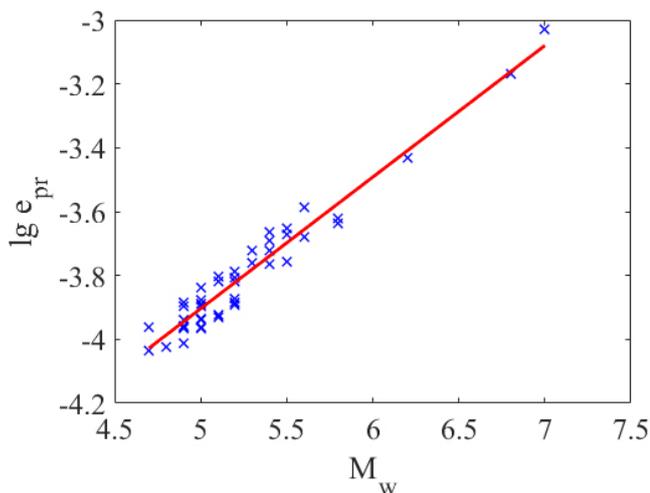


Рис. 9. Зависимость приведенной сейсмической энергии от магнитуды землетрясения для событий с глубиной гипоцентров до 60 км. Уравнение регрессии (красная линия) $\lg e_{pr} = 0.41M_w - 5.96$.

Fig. 9. Dependence of the reduced seismic energy on the magnitude of the earthquake for the events with a depth of hypocenters up to 60 km. The regression equation (red line) $\lg e_{pr} = 0.41M_w - 5.96$.

детерминации R^2 [32] составляет 0.94, что демонстрирует хорошую функциональную зависимость между переменными [33]. Согласно аргументации [16], необходимым условием геомеханического самоподобия очагов является отсутствие статистически значимой взаимосвязи между приведенной сейсмической энергией и скалярным сейсмическим моментом (или моментной магнитудой). Таким образом, для землетрясений с глубиной гипоцентров до 60 км, произошедших на о. Сахалин и прилегающей акватории Охотского и Японского морей, подобие очагов не реализовано. Этот результат аналогичен отмеченному в [11] по данным о динамических параметрах очагов слабых ($M_w < 3.6$) землетрясений в Северном Тянь-Шане. Таким образом, для нескольких регионов установлено, что между усредненными величинами скалярного сейсмического момента сброшенных напряжений и приведенной сейсмической энергии существует монотонно растущая зависимость.

Заключение

С использованием феноменологического подхода, опирающегося на наличие регрессионной зависимости радиуса очага от скалярно-

го сейсмического момента M_0 (или моментной магнитуды M_w), получены значения динамических параметров для 110 землетрясений на Сахалине и окружающих акваториях, произошедших в 1978–2024 гг. В качестве исходных данных использована информация из каталога СМТ о скалярном сейсмическом моменте для очагов этих событий. В результате значительно увеличен объем данных по сброшенным напряжениям и приведенной сейсмической энергии для землетрясений в Сахалинском регионе, по сравнению с каталогом динамических параметров землетрясений в северо-западной части Тихого океана за 1969–1996 [8], где содержится только 8 записей для Сахалина. Использованный подход опирается на концепцию о взаимосвязи $r = f(M_w)$, что соответствует узкому диапазону значений скорости разрыва $V_R \sim (0.75-0.9) V_S$. Вместе с тем наблюдались случаи, когда $V_R \sim V_S$ или больше V_S , а также случаи медленных землетрясений с $V_R \ll V_S$. Это ограничивает область применения данного феноменологического подхода. Для картирования распределения сброшенных напряжений и сравнения с геодинамическими обстановками предложено ввести средневзвешенные значения сброшенных напряжений с весовыми коэффициентами, пропорциональными объему очага. Такие значения для очагов с глубинами до 60 км находятся в пределах 0.7–6.8 МПа. Выделены зоны с наименьшими и наибольшими значениями средневзвешенных сброшенных напряжений. В этих же зонах достигается, соответственно, минимум и максимум приведенной сейсмической энергии. Отмечено, что для очагов землетрясений, лежащих на глубинах до 60 км, выполняется линейная регрессия между величинами приведенной сейсмической энергии и моментной магнитуды. Средневзвешенное значение сброшенных напряжений для очагов на этих глубинах с типом подвижки «горизонтальный сдвиг» составляет 6.8 МПа, что заметно больше, чем для других типов. А на глубинах более 60 км наибольшее значение $\langle \Delta\sigma \rangle_v = 12.3$ МПа оказалось у очагов с подвижкой «взброс».

Список литературы

1. Завьялов А.Д. **2006.** *Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы, методика, реализация.* М.: Наука, 242 с.
2. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. **2012.** The current state of art in earthquake prediction, typical precursors, and experience in earthquake forecasting at Sakhalin Island and surrounding areas. In: *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*, Ch. 5, p. 43–78. <https://doi.org/10.5772/28689>
3. Тараканов Р.З., Тихонов И.Н. **2011.** Сахалинская сейсмология: развитие и некоторые результаты. *Вестник ДВО РАН*, 6: 34–42.
4. Тихонов И.Н., Михайлов В.И., Малышев А.И. **2017.** Моделирование последовательностей землетрясений юга Сахалина, предвещающих сильные толчки, с целью краткосрочного прогноза времени их возникновения. *Тихоокеанская геология*, 36(1): 5–14. EDN: XWRJZN
5. Дружин Г.И., Марапулец Ю.В., Чернева Н.В., Исаев А.Ю., Солодчук А.А. **2017.** Акустические и электромагнитные излучения перед землетрясением на Камчатке. *Доклады АН*, 472(5): 584–589. EDN: BIRGXD
6. Закупин А.С., Богинская Н.В. **2022.** Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на примере сильнейших землетрясений XXI столетия. *Литосфера*, 22(6): 872–881. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-872-881>
7. Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Descherevskii, Lander A.V., Morozova Yu.V., Buss Yu.Yu., Vlasov Yu.A. **2020.** Stress-strain state monitoring of the geological medium based on the multi-instrumental measurements in boreholes: Experience of research at the Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic testing site (Kamchatka, Russia). *Pure Applied Geophysics*, 177(1): 397–419. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02311-3>
8. Бурымская Р.Н. **2001.** Спектральный состав излучения и очаговые параметры землетрясений северо-западной части Тихого океана за 1969–1996 годы. В кн.: *Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана.* Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, т. 1, с. 48–67.
9. Brune J.N. **1970.** Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 75(26): 4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
10. Brune J.N. **1971.** Corrections. *J. of Geophysical Research*, 76: 5002.
11. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. **2020.** О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии. *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 393–416. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.393-416.417-446>
12. Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. **2014.** *Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин.* Владивосток: Дальнаука, 251 с.
13. Татаурова А.А. **2015.** Поля напряжений и деформаций по данным механизмов коровых землетрясений о. Сахалин. *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*, 3(27): 93–101.
14. Scholz C.H. **2002.** *The mechanics of earthquakes and faulting.* Cambridge: Cambridge University Press, 496 p.
15. Madariaga R. **2011.** Earthquake scaling laws. In: R.A. Meyers (ed.) *Extreme environmental events: Complexity in forecasting and early warning.* Springer, 364–383. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6_22
16. Кочарян Г.Г. **2016.** *Геомеханика разломов.* Российская академия наук, Институт динамики геосфер, Российский научный фонд. М.: ГЕОС, 424 с.
17. Ризниченко Ю.В. **1985.** *Проблемы сейсмологии: Избранные труды.* М.: Наука, 408 с.
18. Kanamori H. **1977.** The energy release in great earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 82(20): 2981–2987.
19. Ключевский А.В., Демьянович В.М. **2002.** Динамические параметры очагов землетрясений Байкальской сейсмической зоны. *Физика Земли*, 2: 55–66
20. Madariaga R. **1979.** On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity. *J. of Geophysical Research*, 84: 2243–2250. <https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02243>
21. Kanamori H., Brodsky E.E. **2004.** The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*. 67: 1429–1496.
22. Kaneko Y, Shearer P.M. **2014.** Seismic source spectra and estimated stress drop derived from cohesive-zone models of circular subshear rupture. *Geophys. J. Int.* 197: 1002–1015. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu030>.
23. Zelenin E.A, Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. **2022.** The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Science Data*, 14: 4489–4503.
24. Юнга С. Л. **1990.** *Методы и результаты изучения сейсмостектонических деформаций.* М.: Наука, 190 с.
25. Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Кузиков С.И. **2020.** *Вычислительные технологии в сейсмологических исследованиях (на примере KNET, Северный Тянь-Шань).* Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 358 с.
26. Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А. **2017.** Неотектоника и тектонические напряжения острова Сахалин. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(1): 181–202. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
27. Сим Л.А., Каменев П.А., Богомолов Л.М. **2020.** Новые данные о новейшем напряженном состоянии земной коры острова Сахалин (по структурно-

- геоморфологическим индикаторам тектонических напряжений). *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 372–384. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.372-383>
28. Тихомиров В.М. **1970**. *Плотность горных пород и геологическое картирование в условиях Сахалина*. М.: Наука, 111 с.
 29. Патрикеев В.Н., Ломтев В.Л. **2016**. Разломы северного Сахалина: особенности строения и сейсмическая опасность. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*, 3: 44–58.
 30. Соловьев В.Н., Тихонов И.Н., Кожурин А.И. **2014**. Уточнение фоновой сейсмичности на участке изысканий «Сахалинская ГРЭС-2» (о. Сахалин). *Вопросы инженерной сейсмологии*, 41(2): 60–76.
 31. Добрынина А.А. **2009**. Очаговые параметры землетрясений Байкальской рифтовой зоны. *Физика Земли*, 12: 60–75.
 32. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. **2001**. *Прикладная статистика. Основы эконометрики*: в 2 т. М.: Юнити-Дана. 1088 с.
 33. Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А. **2004**. *Эконометрика. Начальный курс*. М.: Дело. 576 с.
- References**
1. Zavyalov A.D. **2006**. [*Medium-term earthquake forecast. Fundamentals, methodology, implementation*]. Moscow: Nauka, 242 p. (In Russ.).
 2. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. **2012**. The current state of art in earthquake prediction, typical precursors, and experience in earthquake forecasting at Sakhalin Island and surrounding areas. In: *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*, Ch. 5, p. 43–78. <https://doi.org/10.5772/28689>
 3. Tarakanov R.Z., Tikhonov I.N. **2011**. [Sakhalin seismology: development and some results]. *Vestnik of the FEB RAS*, 6: 34–42. (In Russ.).
 4. Tikhonov I.N., Mikhaylov V.I., Malyshev A.I. **2017**. Modeling the Southern Sakhalin earthquake sequences preceding strong shocks for short-term prediction of their origin time. *Russian J. of Pacific Geology*, 11(1): 1–10. <https://doi.org/10.1134/s1819714017010092>
 5. Druzhin G.I., Marapulets Yu.V., Cherneva N.V., Isaev A.A., Solodchuk A.A. **2017**. Acoustic and electromagnetic emissions preceding the earthquake in Kamchatka. *Doklady Earth Sciences*, 472: 215–219. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17020118>
 6. Zakupin A.S., Boginskaya N.V. **2022**. Medium-term earthquake forecasts by the LURR method on the example of the strongest earthquakes of the 21st century. *Lithosphere*, 22(6): 872–881. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-872-881>
 7. Gavrilov V.A., Pantelev I.A., Descherevskii, Lander A.V., Morozova Yu.V., Buss Yu.Yu., Vlasov Yu.A. **2020**. Stress-strain state monitoring of the geological medium based on the multi-instrumental measurements in boreholes: Experience of research at the Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic testing site (Kamchatka, Russia). *Pure Applied Geophysics*, 177(1): 397–419. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02311-3>
 8. Burymskaya R.N. **2001**. [Spectral composition of radiation and the source parameters of earthquake in the northwestern Pacific during 1969–1996]. In: A.I. Ivashchenko (ed.) [*Dynamics of source zones and forecast of the strong earthquakes in the Northwestern Pacific*]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, vol. 1, p. 48–67. (In Russ.).
 9. Brune J.N. **1970**. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 75(26): 4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
 10. Brune J.N. **1971**. Corrections. *J. of Geophysical Research*, 76: 5002.
 11. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. **2020**. On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 417–446. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.393-416.417-446>
 12. Konovalov A.V., Nagornyykh T.V., Safonov D.A. **2014**. [*Modern research on the mechanisms of earthquake foci on Sakhalin Island*]. Vladivostok: Dal'nauka, 251 p.
 13. Tataurova A.A. **2015**. Stress and strain fields based on data on crustal earthquake mechanisms in Sakhalin Island. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 3(27): 93–101. (In Russ.).
 14. Scholz C.H. **2002**. *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 496 p.
 15. Madariaga R. **2011**. Earthquake scaling laws. In: R.A. Meyers (ed.) *Extreme environmental events: Complexity in forecasting and early warning*. Springer, 364–383. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6_22
 16. Kocharyan G.G. **2016**. *Geomechanics of faults*. Moscow: GEOS, 424 p. (In Russ.).
 17. Riznichenko Yu.V. **1985**. [*Problems of seismology: Selected works*]. Moscow: Nauka, 408 p. (In Russ.).
 18. Kanamori H. **1977**. The energy release in great earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 82(20): 2981–2987.
 19. Klyuchevskii A.V., Demjanovich V.M. **2002**. Source amplitude parameters of strong earthquakes in the Baikal seismic zone. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 38(2): 139–148.
 20. Madariaga R. **1979**. On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity. *J. of Geophysical Research*, 84: 2243–2250. <https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02243>
 21. Kanamori H., Brodsky E.E. **2004**. The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*. 67: 1429–1496.

22. Kaneko Y, Shearer P.M. **2014**. Seismic source spectra and estimated stress drop derived from cohesive-zone models of circular subshear rupture. *Geophysical Journal International*, 197: 1002–1015. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu030>.
23. Zelenin E.A, Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. **2022**. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Science Data*, 14: 4489-4503.
24. Yunga S.L. **1990**. [*Methods and results of studying seismic tectonic deformations*]. Moscow: Nauka, 191 p. (In Russ.).
25. Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Kuzikov S.I. **2020**. [*Computational technologies in seismological studies (on the example of KNET, Northern Tian Shan)*] Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 358 p. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.30730/978-5-6040621-6-6.2020-2>
26. Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V., Savvichev P.A. **2017**. Neotectonics and tectonic stresses of the Sakhalin Island. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(1): 181–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
27. Sim L.A., Kamenev P.A., Bogomolov L.M. **2020**. New data on the latest stress state of the earth's crust on Sakhalin Island (based on structural and geomorphological indicators of tectonic stress). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 372–383. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.372-383>
28. Tikhomirov V.M. **1970**. [*Rock density and geological mapping in Sakhalin conditions*]. Moscow: Nauka, 111 p. (In Russ.).
29. Patrikeev V.N., Lomtev V.L. **2016**. Northern Sakhalin faults: structure peculiarities and seismic hazard. *Geology and Mineral Resources of World Ocean*, 3: 44–58. (In Russ.).
30. Soloviev S.L., Tikhonov I.N., Kozhurin A.I. **2014**. Refinement of background seismicity within the site location of the power plant «Sakhalinskaja GRES-2» (Sakhalin Island). *Problems of Engineering Seismology*, 41(2): 60–76. (In Russ.).
31. Dobrynina A.A. **2009**. Source parameters of the earthquakes of the Baikal Rift System. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 45(12): 1093–1109.
32. Ayvaz'an S.A., Mkhitar'an V.S. **2001**. [*Applied statistics. Fundamentals of econometrics*]: in 2 vol. Moscow: Yuniti-Dana, 1088 p. (In Russ.).
33. Magnus YA.R., Katyshev P.K., Peresetskiy A.A. **2004**. [*Econometrics: The initial course*]. Moscow: Delo Publ., 576 p. (In Russ.).

APPENDIX / ПРИЛОЖЕНИЕ

Параметры гипоцентров и динамические параметры очагов землетрясений на Сахалине и прилегающих акваториях Охотского и Японского морей

Hypocenter parameters and dynamic parameters of earthquake sources on Sakhalin and adjacent area of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan

No.	Date	$\varphi, ^\circ\text{N}$	$\lambda, ^\circ\text{E}$	h, km	M_w	$M_0 \cdot 10^{17}, \text{N}\cdot\text{m}$	$r_B \cdot 10^3, \text{m}$	$r_M \cdot 10^3, \text{m}$	$\Delta\sigma, \text{MPa}$	$e_{PR} \cdot 10^{-4}$
1	1978:11:15	47.78	146.30	15.0	5.4	1.76	5.30	3.72	1.49	5.85
2	1979:07:28	49.48	142.41	15.0	5.5	2.47	5.75	4.04	1.63	6.41
3	1980:12:22	48.14	145.95	485.1	5.5	2.33	5.75	4.04	1.54	6.04
4	1981:02:06	48.24	146.48	517.1	5.7	4.82	6.79	4.77	1.94	7.60
5	1982:07:14	45.62	142.57	328.7	5.4	1.80	5.30	3.72	1.53	5.99
6	1982:11:27	50.22	147.01	628.0	6.0	13.40	8.71	6.12	2.56	10.02
7	1983:03:17	51.60	140.84	15.0	5.1	0.48	4.13	2.90	0.86	3.38
8	1984:02:01	49.10	146.31	581.3	6.3	36.00	11.17	7.85	3.26	12.77
9	1984:04:23	47.49	146.56	417.0	6.5	60.10	13.18	9.26	3.31	12.96
10	1984:12:22	50.17	142.79	37.8	5.2	0.68	4.49	3.15	0.94	3.70
11	1985:01:06	45.56	143.06	332.5	5.3	1.02	4.88	3.43	1.11	4.35
12	1985:02:23	47.31	145.57	429.3	5.3	1.14	4.88	3.43	1.24	4.86
13	1985:10:18	46.05	146.10	277.1	5.7	5.00	6.79	4.77	2.01	7.89
14	1987:05:07	46.67	139.01	442.2	6.8	176.00	16.90	11.88	4.59	18.00

No.	Date	$\varphi, ^\circ\text{N}$	$\lambda, ^\circ\text{E}$	h, km	M_w	$M_0 \cdot 10^{17}, \text{N}\cdot\text{m}$	$r_B \cdot 10^3, \text{m}$	$r_M \cdot 10^3, \text{m}$	$\Delta\sigma, \text{MPa}$	$e_{PR} \cdot 10^{-4}$
15	1987:05:18	49.12	147.39	551.7	6.8	170.00	16.90	11.88	4.44	17.39
16	1988:06:26	45.92	144.25	374.0	5.1	0.55	4.13	2.90	0.99	3.88
17	1989:08:29	48.00	147.43	444.3	5.2	0.73	4.49	3.15	1.02	4.00
18	1990:05:12	48.94	141.38	612.5	7.2	818.00	23.55	16.55	7.90	30.95
19	1990:08:20	46.21	142.26	348.0	5.7	4.42	6.79	4.77	1.78	6.97
20	1991:07:05	47.96	145.91	465.2	5.8	7.26	7.38	5.19	2.28	8.93
21	1992:03:27	48.01	147.07	450.6	5.6	3.35	6.25	4.39	1.73	6.77
22	1992:06:16	45.49	142.47	330.4	6.0	11.30	8.71	6.12	2.16	8.45
23	1993:01:24	45.64	142.08	312.3	5.3	0.97	4.88	3.43	1.06	4.15
24	1993:02:09	45.66	141.94	314.4	5.6	2.86	6.25	4.39	1.48	5.78
25	1993:08:30	48.38	143.64	44.9	4.9	0.27	3.50	2.46	0.81	3.16
26	1994:12:13	53.94	141.84	35.3	5.2	0.80	4.49	3.15	1.11	4.37
27	1995:02:18	46.61	145.77	353.0	5.5	1.97	5.75	4.04	1.30	5.11
28	1995:03:10	46.10	143.31	354.8	5.6	3.61	6.25	4.39	1.86	7.30
29	1995:05:27	53.03	142.65	23.6	7.0	432.00	19.95	14.02	6.86	26.87
30	1995:05:28	52.98	142.96	25.8	5.0	0.41	3.80	2.67	0.94	3.67
31	1995:06:13	53.09	142.88	15.0	5.1	0.65	4.13	2.90	1.15	4.52
32	1995:06:13	52.61	143.11	15.0	5.1	0.65	4.13	2.90	1.16	4.53
33	1995:09:30	51.85	142.91	33.0	5.4	1.88	5.30	3.72	1.60	6.25
34	1995:12:18	52.53	143.02	15.0	5.3	1.28	4.88	3.43	1.39	5.46
35	1996:01:08	53.31	142.57	15.0	5.6	2.99	6.25	4.39	1.54	6.05
36	1997:11:28	46.96	145.81	401.0	5.5	2.13	5.75	4.04	1.41	5.52
37	2000:07:10	46.83	145.59	361.3	5.8	6.52	7.38	5.19	2.05	8.02
38	2000:08:04	48.77	142.03	15.0	6.8	192.00	16.90	11.88	5.01	19.64
39	2000:08:10	48.73	142.17	15.0	5.2	0.69	4.49	3.15	0.96	3.77
40	2001:02:26	46.79	144.54	396.4	6.0	14.90	8.71	6.12	2.84	11.14
41	2001:09:01	47.44	142.53	15.0	5.2	0.70	4.49	3.15	0.98	3.85
42	2002:02:09	45.97	142.31	356.3	5.4	1.78	5.30	3.72	1.51	5.92
43	2002:03:07	47.97	146.93	453.8	5.6	2.78	6.25	4.39	1.43	5.62
44	2002:11:05	49.06	142.28	604.0	5.6	2.81	6.25	4.39	1.45	5.68
45	2002:11:17	47.81	146.45	479.8	7.3	1050.00	25.59	17.98	7.90	30.98
46	2003:02:08	48.45	142.71	45.1	5.1	0.49	4.13	2.90	0.88	3.44
47	2003:07:27	46.99	139.23	477.2	6.7	146.00	15.56	10.93	4.89	19.15
48	2004:04:17	46.96	145.64	408.3	5.3	0.99	4.88	3.43	1.07	4.21
49	2004:05:30	47.34	142.01	19.2	4.9	0.27	3.50	2.46	0.80	3.12
50	2004:11:07	47.93	144.52	493.0	6.1	18.10	9.46	6.65	2.69	10.56
51	2005:03:08	52.34	141.72	17.4	5.0	0.37	3.80	2.67	0.85	3.33
52	2005:06:12	52.85	143.92	15.0	5.5	1.94	5.75	4.04	1.28	5.03
53	2006:03:14	48.04	147.46	420.3	5.3	1.26	4.88	3.43	1.37	5.37
54	2006:06:16	46.44	144.56	375.3	5.3	1.28	4.88	3.43	1.39	5.46
55	2006:08:17	46.54	141.77	18.1	5.6	3.68	6.25	4.39	1.90	7.44
56	2006:09:13	46.75	146.46	351.1	5.3	1.22	4.88	3.43	1.33	5.20

No.	Date	$\varphi, ^\circ\text{N}$	$\lambda, ^\circ\text{E}$	h, km	M_w	$M_0 \cdot 10^{17}, \text{N}\cdot\text{m}$	$r_B \cdot 10^3, \text{m}$	$r_M \cdot 10^3, \text{m}$	$\Delta\sigma, \text{MPa}$	$e_{PR} \cdot 10^{-4}$
57	2007:03:28	44.90	146.28	209.6	5.0	0.39	3.80	2.67	0.90	3.52
58	2007:08:02	46.84	141.82	12.0	6.2	23.50	10.28	7.22	2.73	10.69
59	2007:08:02	46.81	141.67	13.4	5.8	5.42	7.38	5.19	1.70	6.67
60	2007:08:02	46.71	141.78	18.2	5.2	0.86	4.49	3.15	1.19	4.68
61	2007:08:02	46.73	141.63	12.0	5.4	1.65	5.30	3.72	1.40	5.49
62	2007:08:14	46.86	141.74	12.0	5.4	1.49	5.30	3.72	1.26	4.95
63	2008:09:18	46.18	143.49	343.8	5.4	1.39	5.30	3.72	1.18	4.62
64	2009:10:26	47.61	145.20	480.2	5.3	1.03	4.88	3.43	1.12	4.39
65	2010:03:16	52.14	142.09	12.0	5.8	5.39	7.38	5.19	1.69	6.63
66	2010:07:09	52.12	142.06	13.1	5.0	0.35	3.80	2.67	0.79	3.11
67	2010:11:02	46.82	146.87	362.4	5.5	1.98	5.75	4.04	1.31	5.13
68	2011:12:09	46.93	144.60	390.0	5.8	5.43	7.38	5.19	1.70	6.68
69	2011:12:12	50.70	142.97	16.4	5.1	0.62	4.13	2.90	1.11	4.37
70	2012:02:07	45.53	142.18	317.8	5.2	0.89	4.49	3.15	1.24	4.87
71	2012:07:09	49.12	147.25	556.0	5.4	1.53	5.30	3.72	1.30	5.09
72	2012:07:29	47.29	138.90	506.9	5.7	4.69	6.79	4.77	1.89	7.40
73	2012:08:14	49.97	145.70	598.2	7.7	4840.00	35.65	25.05	13.47	52.81
74	2012:09:22	45.99	141.78	328.5	5.2	0.74	4.49	3.15	1.03	4.05
75	2012:10:21	53.52	142.48	12.0	5.0	0.37	3.80	2.67	0.86	3.36
76	2013:01:03	45.01	141.73	23.2	4.9	0.24	3.50	2.46	0.71	2.79
77	2013:03:27	45.42	142.65	288.4	5.0	0.47	3.80	2.67	1.07	4.21
78	2013:07:04	46.83	141.62	17.9	5.0	0.47	3.80	2.67	1.07	4.20
79	2013:08:04	46.97	145.22	378.0	5.8	7.19	7.38	5.19	2.26	8.84
80	2013:11:24	52.02	142.10	20.1	4.9	0.28	3.50	2.46	0.81	3.18
81	2013:11:25	45.93	141.63	20.6	5.2	0.82	4.49	3.15	1.14	4.48
82	2014:02:19	52.36	143.33	17.8	4.9	0.33	3.50	2.46	0.96	3.75
83	2014:02:20	46.07	142.38	329.3	5.1	0.66	4.13	2.90	1.18	4.63
84	2014:09:16	45.12	147.06	18.1	5.0	0.35	3.80	2.67	0.81	3.16
85	2015:01:14	48.94	141.97	591.4	5.3	0.98	4.88	3.43	1.07	4.18
86	2015:08:27	45.01	147.39	154.2	5.1	0.58	4.13	2.90	1.05	4.10
87	2016:07:23	47.68	146.91	423.2	5.8	7.11	7.38	5.19	2.23	8.74
88	2016:08:14	50.45	142.30	12.5	5.8	5.58	7.38	5.19	1.75	6.86
89	2016:08:15	50.55	142.28	14.6	4.9	0.29	3.50	2.46	0.85	3.33
90	2016:08:17	50.50	142.33	13.3	4.7	0.17	2.96	2.08	0.80	3.15
91	2016:09:26	45.30	147.26	22.6	4.9	0.32	3.50	2.46	0.94	3.67
92	2017:04:23	46.25	141.98	14.9	5.1	0.62	4.13	2.90	1.11	4.37
93	2017:11:29	45.31	146.34	17.0	5.5	2.36	5.75	4.04	1.56	6.12
94	2018:07:01	47.02	144.88	398.9	5.6	3.66	6.25	4.39	1.89	7.40
95	2018:11:02	47.81	146.65	446.7	6.0	13.90	8.71	6.12	2.65	10.40
96	2019:07:09	47.35	144.86	450.9	5.6	3.30	6.25	4.39	1.70	6.67
97	2020:09:13	48.93	142.08	14.0	4.8	0.18	3.22	2.26	0.69	2.72
98	2020:11:30	48.30	140.61	599.7	6.4	51.50	12.13	8.53	3.63	14.24

No.	Date	$\varphi, ^\circ\text{N}$	$\lambda, ^\circ\text{E}$	h, km	M_w	$M_0 \cdot 10^{17}, \text{N}\cdot\text{m}$	$r_B \cdot 10^3, \text{m}$	$r_M \cdot 10^3, \text{m}$	$\Delta\sigma, \text{MPa}$	$e_{PR} \cdot 10^{-4}$
99	2021:09:03	49.44	146.87	588.0	5.8	5.95	7.38	5.19	1.87	7.32
100	2021:09:12	47.10	146.62	360.8	5.4	1.42	5.30	3.72	1.20	4.72
101	2022:02:05	52.59	143.29	12.6	5.3	1.17	4.88	3.43	1.27	4.99
102	2022:02:08	48.48	142.14	13.1	5.0	0.42	3.80	2.67	0.98	3.82
103	2022:03:24	51.98	143.61	22.0	4.7	0.14	2.96	2.08	0.68	2.65
104	2022:07:02	45.91	141.81	320.0	5.9	8.23	8.02	5.63	2.01	7.89
105	2022:08:10	44.95	141.92	13.2	5.0	0.42	3.80	2.67	0.95	3.74
106	2022:08:10	44.93	141.93	13.9	5.2	0.80	4.49	3.15	1.12	4.38
107	2023:06:17	47.95	147.37	413.8	5.7	4.77	6.79	4.77	1.92	7.52
108	2023:06:23	45.86	142.93	329.4	5.7	3.91	6.79	4.77	1.57	6.17
109	2024:08:10	47.10	144.64	412.5	6.5	83.20	13.18	9.26	4.58	17.95
110	2024:11:05	49.40	146.92	581.0	5.4	1.55	5.30	3.72	1.32	5.15

Примечание. φ, λ – широта и долгота, h – глубина, M_w – моментная магнитуда, M_0 – скалярный сейсмический момент, r_B, r_M – радиусы очагов по моделям Брюна и Мадариаги–Канеко–Ширера соответственно, $\Delta\sigma$ – сброшенные касательные напряжения, e_{PR} – приведенная сейсмическая энергия.

Note. φ and λ , latitude and longitude; h , depth; M_w , moment magnitude; M_0 , scalar seismic moment; r_B and r_M , radii of the sources by the models of Brune and Madariaga–Kaneko–Shearer, respectively; $\Delta\sigma$, shear stress drop; e_{PR} , reduced seismic energy.

Об авторах

Сычев Владимир Николаевич (<https://orcid.org/0000-0001-7508-9087>), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Центра коллективного пользования, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, koitash@mail.ru

Богомолов Леонид Михайлович (<https://orcid.org/0000-0002-9124-9797>), доктор физико-математических наук, директор, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, bleom@mail.ru

About the Authors

Sychev, Vladimir N. (<https://orcid.org/0000-0001-7508-9087>), Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Center for Collective Use, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, koitash@mail.ru

Bogomolov, Leonid M. (<https://orcid.org/0000-0002-9124-9797>), Doctor of Physics and Mathematics, Director, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, bleom@mail.ru

Поступила 03.06.2025
Принята к публикации 09.07.2025

Received 3 June 2025
Accepted 9 July 2025