

© Авторы 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.34

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.132-148>
<https://www.elibrary.ru/crpost>

Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2022 году

Д. А. Сафонов*¹, Е. П. Семенова²

*E-mail: d.safonov@imgg.ru

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

²Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. В работе представлен обзор сейсмичности южной части Дальнего Востока России в 2022 г., основанный на данных каталога регионального обрабатывающего центра «Южно-Сахалинск» Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН». Рассчитаны основные параметры сейсмичности: статистическая оценка уровня сейсмичности СОУС'09, графики Бенъофа, карты плотности условной упругой деформации в 2022 г. в сравнении с предыдущим более длительным временным интервалом. Дан краткий анализ наиболее значимых и интересных для детального изучения землетрясений. Сейсмичность Курило-Охотского, Сахалинского регионов и региона Приамурья и Приморья в 2022 г. оставалась в пределах фоновых значений. При этом в Сахалинском регионе отмечена сейсмическая активизация, проявившаяся умеренно-сильными событиями на северо-восточном шельфе, в Углегорском районе, к северу от п-ова Шмидта, а также сильным глубокофокусным событием в прол. Лаперуза с $M_w = 5.9$. Наиболее сильное землетрясение Курило-Охотского региона с $M_w = 6.0$ произошло в южной части Курильской островной дуги. Рассмотрена продолжительная серия умеренно-сильных событий на Средних Курилах с M_w до 5.6. Отмечена проблема оперативной обработки землетрясений Приамурья и Приморья в связи с уменьшающимся количеством сейсмических станций в этом регионе, а также систематическая недооценка энергетических характеристик глубокофокусных землетрясений.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмичность, сейсмическая активность, Приамурье, Приморье, Сахалин, Курило-Охотский регион

Seismicity of the South Far East of Russia in 2022

Dmitry A. Safonov*¹, Elena P. Semenova²

*E-mail: d.safonov@imgg.ru

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Sakhalin Branch, FRC "United Geophysical Survey of RAS", Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. The paper presents a review of the seismicity of the southern part of the Russian Far East in 2022 based on the data from the catalog of the "Yuzhno-Sakhalinsk" Regional Information Processing Center of the Sakhalin Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences". The main parameters of the seismicity, such as the statistical estimation of seismicity level SESL'09, Benioff diagrams, density maps of conditional elastic deformation in 2022 compared to the previous longer time interval, are estimated. A brief analysis of the most significant and interesting earthquakes for detailed study is given. The seismicity of the Kuril-Okhotsk, Sakhalin and the Amur and Primorye regions in 2022 remained within the background values. At the same time, seismic activation was noted in the Sakhalin region, manifested in a number of moderately strong events on the northeastern shelf, in the Uglegorsky district, north of the Schmidt Peninsula, as well as a strong mantle event in the La Perouse Strait with $M_w = 5.9$. The strongest earthquake of the Kuril-Okhotsk region with $M_w = 6.0$ occurred in the southern part of the Kuril Island arc. A long series of moderately strong events in the Middle Kurils with M_w up to 5.6 attracts attention. The problem of operational processing of earthquakes in the Amur region and Primorye due to the decreasing number of seismic stations in this region is noted, as well as the systematic underestimation of the energy characteristics of deep-focus earthquakes.

Keywords: earthquakes, seismicity, seismic activity, Amur region, Primorye, Sakhalin, Kuril-Okhotsk region

Для цитирования: Сафонов Д.А., Семёнова Е.П. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2022 году. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 2, с. 132–148. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.2.132-148>; <https://www.elibrary.ru/crpost>

Финансирование и благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного финансирования Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121022000085-9) 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/>). Авторы признательны рецензентам за конструктивные замечания.

Введение

Статья продолжает ежегодные обзоры [1] сейсмичности территории юга Дальнего Востока России на основе оперативного каталога землетрясений регионального информационно-обрабатывающего центра (РИОЦ) «Южно-Сахалинск» Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН).

Одной из основных задач РИОЦ «Южно-Сахалинск» является мониторинг сейсмичности зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН, которая включает в себя регионы Приамурье и Приморье, Сахалинский, Курило-Охотский.

Каталог РИОЦ «Южно-Сахалинск» содержит основные параметры зарегистрированных землетрясений, обработанных в оперативном режиме. В качестве основной энергетической характеристики принимается региональная магнитуда M_{wa} , для сильных событий ($M > 5.5$) базовой считается региональная моментная магнитуда $M_{w_{per}}$, если такая определялась. К моменту написания статьи для отдельных сильных и умеренно-сильных землетрясений был определен механизм очага [2, 3].

Цель работы – оценить сейсмичность южной части Дальнего Востока РФ по оперативным данным. Основной акцент в статье сосредоточен на наиболее сильных по магнитуде и макросейсмическому эффекту землетрясениях, более детальные данные по которым станут доступны после окончательной обработки в течение следующего года.

Обзор сейсмичности приведен с использованием основных характеристик: статистиче-

For citation: Safonov D.A., Semenova E.P. Seismicity of the South Far East of Russia in 2022. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 132–148. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.2.132-148>; <https://www.elibrary.ru/crpost>

Funding and acknowledgements

The study was carried out within the framework of state funding of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme no. 12102200002000085-9) using the data obtained from a unique research facility “Seismic infrasound monitoring array for monitoring Arctic cryolithozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

The Authors are grateful to the Reviewers for the constructive suggestions.

ской оценки уровня сейсмичности СОУС’09, графиков Бенъофа. Для демонстрации пространственного распределения сейсмичности приведены карты эпицентров и плотности условной упругой деформации.

Исходные данные

Сеть сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2022 г. по сравнению с предыдущими годами [1, 4] несколько уменьшилась (рис. 1, 2). 30 сентября 2022 г. была закрыта сейсмическая станция «Горнотаежное» (GRTR). К концу 2022 г. сеть официально состояла из 47 пунктов непрерывных наблюдений: 37 стационарных и 10 автономных полевых локальной сети на юге о. Сахалин. С части стационарных сейсмических станций, включая «Вал» (VAL), «Головнино» (GLVR), «Новиково» (NOV), «Плато» (SK2), данные в течение года по техническим причинам фактически не поступали, со станции «Экимчан» (EKMR) данные поступали лишь первую треть года. Станции локальной сети южного Сахалина, а также Приамурья: «Бомнак» (BMKR), «Кировский» (KROS), «Октябрьский» (OCTB) и расположенная севернее станция «Охотск» (OKHT) работают без передачи данных в режиме реального времени, а потому не используются при составлении оперативного каталога. Кроме того, из числа доступных для обработки была часть станций, обслуживаемых другими организациями: «Чегдомын» (CHMN), «Ванино» (VNN), «Мыс Шульца» (MSH), «Ходутка» (KDT). Таким образом, наиболее слабая обеспеченность сейсмическими станциями для

целей оперативного каталога сложилась в регионе Приамурье и Приморье. По этим причинам, а также в связи с относительно слабой сейсмической активностью в оперативном каталоге 2022 г. в пределах данного региона присутствуют лишь 5 коровых и 3 глубокофокусных события. На полноту оперативного каталога остальной части зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН описанные изменения не оказали существенного влияния.

По данным каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» за 2022 год в обзор вошло (рис. 1): 2172 землетрясения Курило-Охотского региона, 443 – Сахалинского региона, 8 – Приамурья и Приморья.

Для 45 землетрясений определен тензор сейсмического момента центраида и моментная магнитуда [2, 3].

На территории юга Дальнего Востока России в 2022 г. зарегистрировано 63 ощутимых

землетрясения: 1 – в Приморье, 19 – в Сахалинском, 41 – в Курило-Охотском регионе и 2 с эпицентрами за пределами зоны ответственности филиала, но ощущавшиеся в населенных пунктах рассматриваемых регионов. Эпицентры ощутимых землетрясений показаны на рис. 2.

Основные характеристики сейсмичности

Одной из базовых характеристик для обобщенного описания сейсмичности является выделяющаяся в изучаемый период сейсмическая энергия, оцениваемая по магнитуде зарегистрированных землетрясений. Для расчета энергии в наших работах применяется формула Рихтера–Гуттенберга [5] для магнитуды по поверхностным волнам M_S или, в случае Дальнего Востока РФ, – M_{LN} . Поскольку в оперативном каталоге основной энергетической

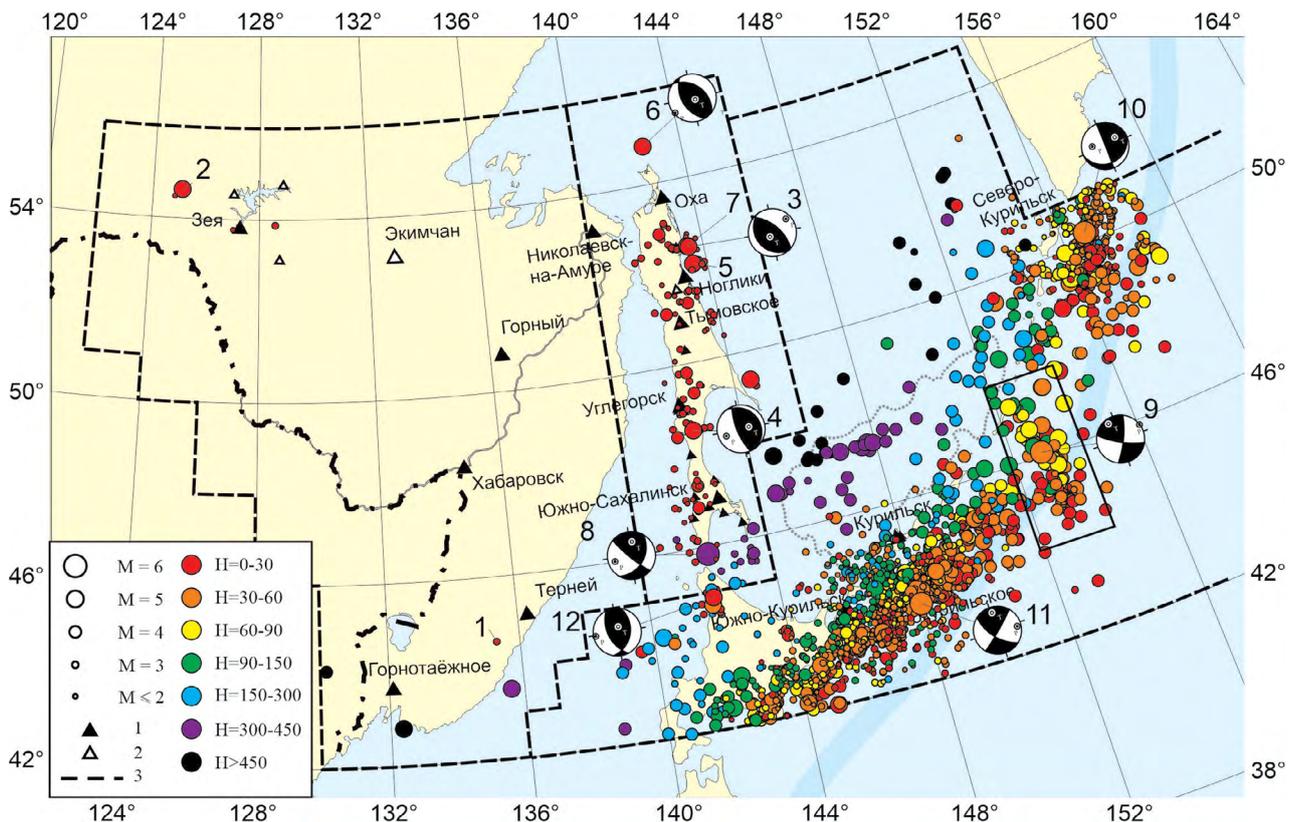


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2021 г. M – магнитуда; H – гиподипцентра, км; 1 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН, используемые в оперативной обработке; 2 – не используемые в оперативной обработке; 3 – границы регионов. Номера эпицентров землетрясений согласно таблице. Приведены механизмы очагов наиболее сильных землетрясений. Выделенный прямоугольником район показан на рис. 9.

Fig. 1. Earthquake epicenters map in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2021. M – magnitude; H – hypocenter depth, km; 1 – seismic stations of the SB FRC UGS RAS used in operational processing; 2 – not used in operational processing; 3 – region borders. Numbers of the earthquake epicenters are given in accordance with Table. Focal mechanisms of the strongest earthquakes are given. The marked area is shown in Fig. 9.

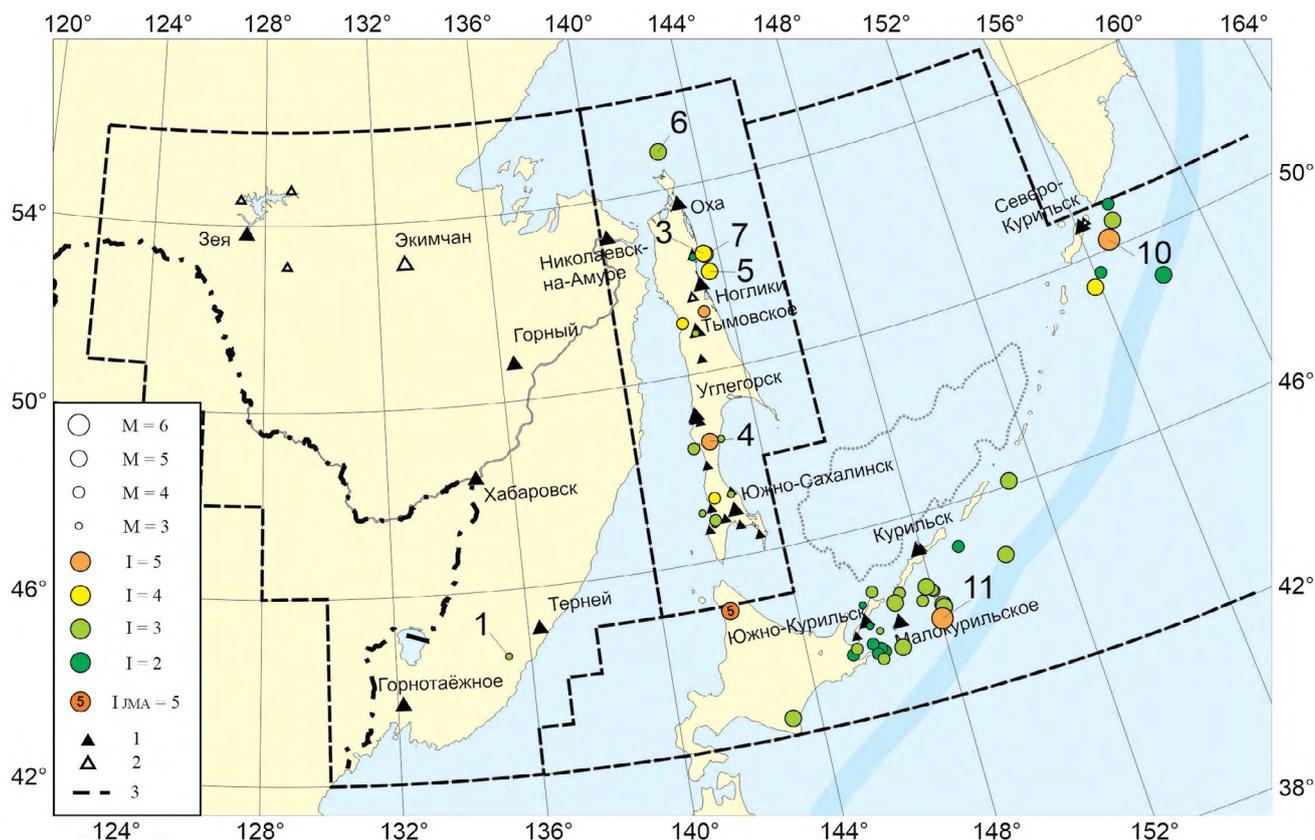


Рис. 2. Карта эпицентров ощутимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2022 г. M – магнитуда; I – максимальная интенсивность сотрясений, балл; 1 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН, используемые в оперативной обработке; 2 – не используемые в оперативной обработке; 3 – границы регионов. Номера эпицентров землетрясений согласно таблице.

Fig. 2. Appreciable earthquake epicenters map in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2022. M – magnitude; I – maximum shaking intensity, point; 1 – seismic stations used in operational processing; 2 – not used in operational processing; 3 – region borders. Numbers of the epicenters are given in accordance with Table.

характеристикой является региональная магнитуда M_{wa} , в предыдущем годовом обзоре была предложена [1] формула для перехода к расчетной магнитуде $M^P(M_{LH})$. При этом для наиболее сильных землетрясений с $M \geq 5.5$ используются значения моментной магнитуды Mw_{per} , а в случае их отсутствия заимствовались значения Mw^* из соображений, что для сильных землетрясений ($M = 6.0-8.0$), как показано в работе [6], магнитуды M_s (она же M_{LH}) и Mw близки.

На рис. 3 б приводится график ежегодной суммарной сейсмической энергии изучаемых регионов за 10 лет с учетом 2022 г. Такое представление позволяет сделать вывод о росте суммарной сейсмической энергии в Приамурье и Приморье и Сахалинском регионе. Однако статистически более обоснованные выводы позволяют построить графики функции распределения годовой сейсмической энергии

по методике СОУС'09 [7] (рис. 4, 5) согласно следующей градации уровней сейсмичности (K – квантиль распределения):

- экстремально высокий – $K(0.995) < \lg \Sigma E$,
- высокий – $K(0.975) < \lg \Sigma E < K(0.995)$,
- фоновый пониженный – $K(0.025) < \lg \Sigma E < K(0.15)$,
- фоновый средний – $K(0.15) < \lg \Sigma E < K(0.85)$,
- фоновый повышенный – $K(0.85) < \lg \Sigma E < K(0.975)$,
- низкий – $K(0.005) < \lg \Sigma E < K(0.025)$,
- экстремально низкий – $\lg \Sigma E < K(0.005)$.

Основой для графиков функции распределения послужили региональные каталоги Приамурья и Приморья 1975–2022 гг., Сахалинского региона 1962–2022, Курило-

* GCMT. The Global Centroid-Moment-Tensor Project. – <https://www.globalcmt.org/> (accessed 31.03.2023)

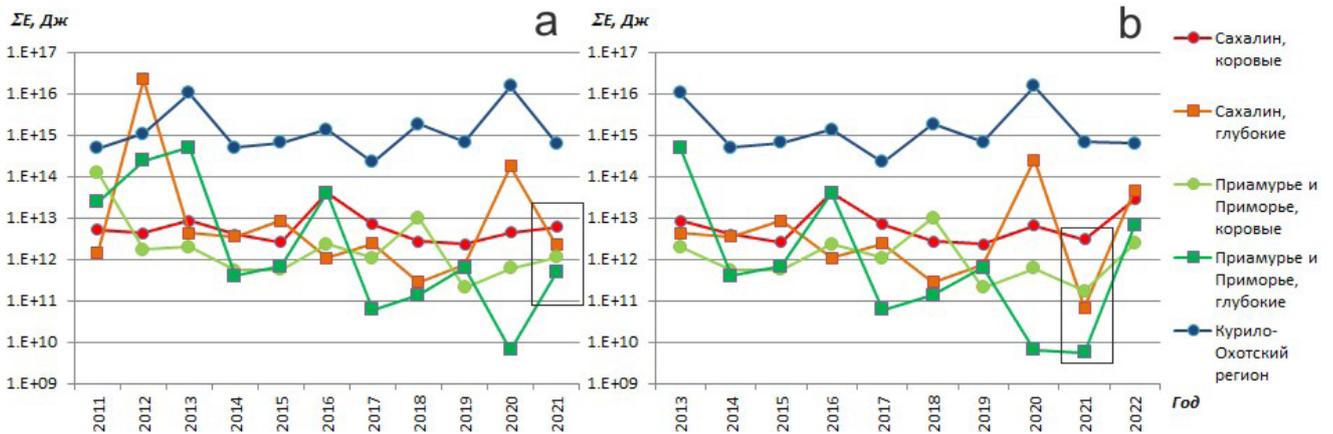


Рис. 3. Суммарная сейсмическая энергия землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН: (а) в 2011–2021 гг. из [1]; (б) в 2013–2022 г. по каталогу, составленному для данной работы.

Fig. 3. Total seismic energy of the earthquakes in the SB FRC UGS RAS responsibility zone: (a) in 2011–2021 from [1]; (b) in 2013–2022 according to the catalog compiled for this work.

Охотского региона 1920–2022 гг. [8–10], дополненные данными Сахалинского филиала СФ ФИЦ ЕГС РАН с учетом оперативного каталога за 2022 г. При этом данные 2021 г. в каталогах, использовавшихся в прошлом обзоре, заменены на окончательные параметры землетрясений Сахалинского филиала, подготовленные к публикации.

В регионе Приамурье и Приморье (рис. 4 а) уровень коровой и глубоководной сейсмичности 2022 г. оценивается как фоновый средний. В Сахалинском регионе (рис. 4 б) уровень коровой сейсмичности фоновый средний, но вблизи верхней границы этого диапазона, глубоководная сейсмичность

находится на повышенном фоновом уровне. В Курило-Охотском регионе (рис. 5) уровень сейсмичности вблизи границы среднего и пониженного фонового, примерно соответствует уровню прошлого года.

При сравнении графиков СОУС’09, полученных в данной статье, с предыдущим вариантом из обзора сейсмичности 2021 г. [1] выяснилось, что суммарный уровень сейсмической энергии Сахалинского региона 2021 г. на графиках годовой давности (рис. 3 а) находится существенно выше, чем на графике для обзора 2022 г. (рис. 3 б). Это относится и к глубоководной, и к коровой сейсмичности. Причина состоит в использовании окончательного ка-

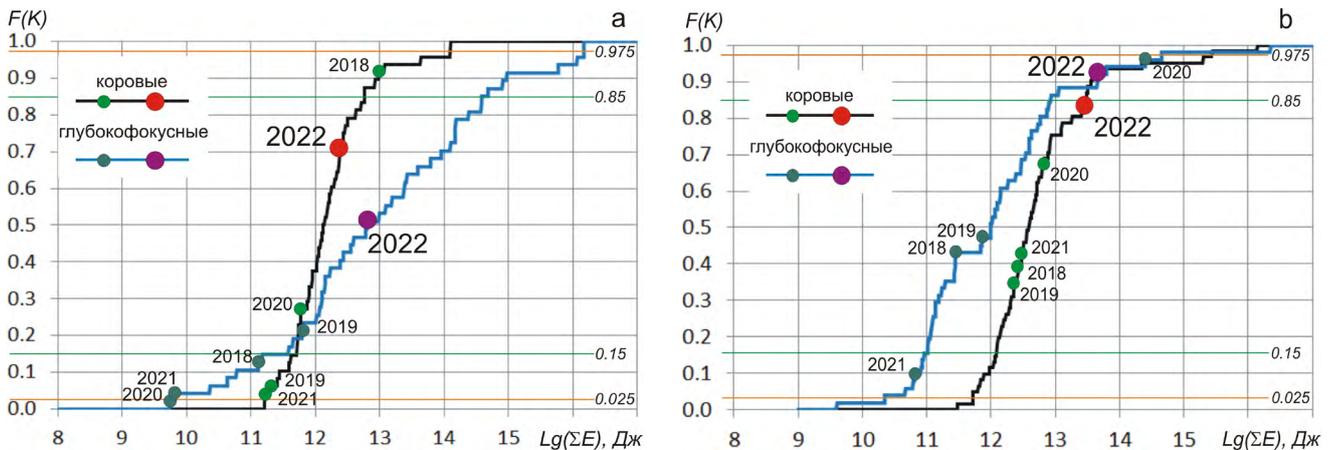


Рис. 4. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии для коровых (черный цвет линии) и мантийных (синий цвет) землетрясений региона Приамурье и Приморье (а) и Сахалинского региона (б). Отмечены точки, соответствующие каждому году периода 2018–2022.

Fig. 4. Empirical distribution function of the annual seismic energy for crustal (black line) and mantle (blue line) earthquakes in the Amur–Primorye region (a) and in the Sakhalin region (b). The points corresponding to each year of the period of 2018–2022 are marked.

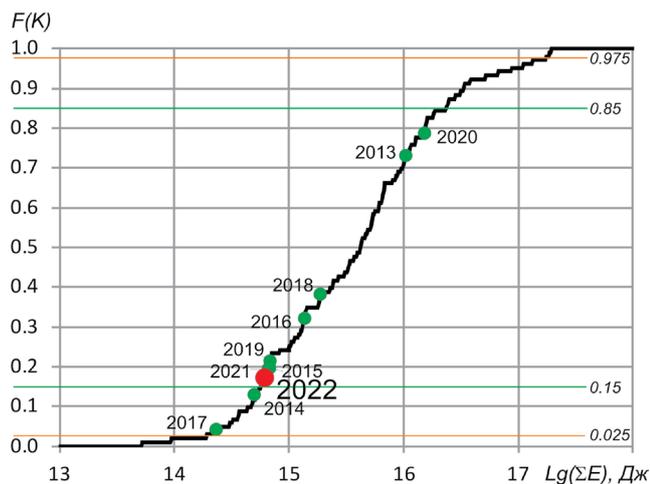


Рис. 5. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии землетрясений Курило-Охотского региона. Отмечены точки, соответствующие каждому году периода 2013–2022.

Fig. 5. Empirical distribution function of the annual seismic energy of the earthquakes in the Kuril-Okhotsk region. The points corresponding to each year of the period of 2013–2022 are marked.

талога землетрясений Сахалинского филиала вместо оперативного. В результате переопределения энергетических характеристик оценка суммарной энергии сахалинских коровых землетрясений в 2021 г. уменьшилась вдвое, а глубокофокусных – на порядок. Также существенно уменьшились показатели суммарной сейсмической энергии 2021 г. в регионе Приамурье и Приморье: для коровых землетрясений – примерно в 7 раз, а для глубокофокусных – почти на два порядка.

Как показывает сравнение оперативного и окончательного каталогов, магнитуда умеренно-сильных и слабых коровых землетрясений, которые в основном были зарегистрированы в этих регионах в 2021 г., получена преимущественно пересчетом из энергетического класса K_C в $M^P(M_{LH})$, по формуле [11]:

$$M^P = (K_C - 1.2)/2. \quad (1)$$

При этом значение M^P действительно оказывается на 0.2–0.4 магнитудных единицы (м.е.) меньше, чем при пересчете из M_{wa} по формуле, приведенной в [1], что и дает разницу в суммарной энергии коровых событий. Кроме того, три относительно сильных коро-

вых землетрясения Приамурья с эпицентрами в пределах региона по оперативным данным не вошли в итоговый каталог, так как по окончательным данным оказались за пределами региона, что является следствием недостаточного развития сети сейсмических станций для целей оперативного определения параметров землетрясений.

Для глубокофокусных землетрясений ситуация несколько иная. Здесь в окончательном каталоге для слабых ($M < 4.5$) событий наиболее распространенными являются магнитуды M_{SHa} и M_{Pva} . Пересчет в M^P производится по формулам [12]:

$$M^P = (M_{SHa} - 1.71) / 0.75, \quad (2)$$

$$M^P = (M_{Pva} - 2.5) / 0.65. \quad (3)$$

При этом расчетные величины на 1–2 м.е. ниже собственных значений M_{SHa} и M_{Pva} , а также M_{wa} (РИОЦ «Южно-Сахалинск»), M_J^* и M_w^{**} . Последние три величины применяются для землетрясений с любой глубиной очага и довольно неплохо сходятся в диапазоне слабых и умеренно-сильных землетрясений, о чем мы сообщали в [13]. То есть применяемые в Сахалинском филиале для пересчета энергетических характеристик формулы дают значительно заниженные оценки магнитуды и нуждаются в пересмотре.

В Курило-Охотском регионе по причине более высокого уровня сейсмичности основной магнитудой, влияющей на суммарную энергию, является M_w , что обеспечивает более или менее однозначную оценку среднегодовой энергии землетрясений. Кроме того, указанные выше формулы для более сильных событий дают лучшее соответствие пересчетных значений. В регионах Приамурье и Приморье и на Сахалине ввиду меньшего количества сильных событий систематическая недооценка магнитуды землетрясений при пересчете прослеживалась и в предыдущие годы, хотя ранее это не было так очевидно, так как магнитуда M_{wa} не использовалась и сопоставления не проводились.

* JMA. Japan Meteorological Agency. – <https://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/earthquake.html> (accessed 31.03.2023).

** NIED. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan. – <http://www.fnet.bosai.go.jp> (accessed 31.03.2023).

Таким образом, необходим пересмотр как методов, применяемых для определения энергетических характеристик, так и переходных соотношений между уже определенными магнитудами и энергетическими классами для каталогов разных лет. В результате это должно привести к пересмотру уровней сейсмичности СОУС'09 и получению более корректных оценок, особенно для мантийной сейсмичности. В настоящий момент сопоставление сейсмической энергии землетрясений регионов Приамурья и Приморья и Сахалинского 2022 г. с предыдущими годами для глубокофокусных землетрясений лишено смысла.

В ходе исследования различных моделей деформирования горных пород в условиях тектонических напряжений Х. Беньоф [14] предположил, что упругая деформация вдоль разломной зоны пропорциональна сумме квадратных корней энергии произошедших здесь землетрясений:

$$E = pW = \frac{1}{2} \mu r \epsilon^2 V \text{ (эрг)}, \quad (4)$$

где W – накопленная упругая энергия, реализуемая в «быстром» землетрясении, E – сейсмическая часть этой энергии, p – доля сейсмической энергии в полной, реализованной при землетрясении, μ – модуль упругости, ϵ – деформация, V – объем среды.

То есть в некоторой системе разломов, если упругая деформация объема среды полностью реализуется в ходе «быстрого» землетрясения, корень излучаемой энергии землетрясения пропорционален упругой деформации (предшествующей землетрясению) этого объема.

$$E^{1/2} = k\epsilon \text{ (эрг}^{1/2}\text{)}. \quad (5)$$

Следовательно, в серии землетрясений для одного объема среды кумулятивная сумма параметра $E^{1/2}$ отдельных событий представляет собой суммарное приращение деформации, и график накопленной суммы этих приращений во времени отражает примерный процесс деформирования среды [14], а усредненный коэффициент наклона графика k отражает скорость накопления упругой энергии.

Подход Беньофа к настоящему времени считается несколько упрощенным, поэтому введенный им параметр $E^{1/2}$ принято называть

«условной» упругой деформацией. Отмечено, что, несмотря на разные магнитуду и временной интервал между сильными землетрясениями, верхняя огибающая получаемого графика остается близка к прямой линии. Причем это верно для рассматриваемых участков деформируемой среды различного масштаба при достаточно большом временном интервале. Наклон графика Беньофа на коротких временных интервалах отражает сейсмическую активизацию либо сейсмическое затишье, предваряющее сильное землетрясение. Наряду с суммарной энергией, оцениваемый по магнитуде землетрясений, параметр Беньофа позволяет отслеживать сейсмический процесс, выделяя стадии затишья, активизации и фонового уровня сейсмичности между сильными событиями.

В отличие от суммарной сейсмической энергии ΣE , использование параметра $\Sigma E^{1/2}$ позволяет уменьшить влияние пиковых значений от наиболее сильных землетрясений; уменьшается влияние погрешности оценки магнитуды отдельных сильных событий, а роль сейсмических активизаций роевого характера возрастает. При этом необходимо помнить, что рассчитываемый параметр не имеет строгого физического смысла, в отличие от суммарной сейсмической энергии или сейсмического момента.

Как и в предыдущих ежегодных обзорах, получен график Беньофа для Курило-Охотского региона. Представлен также график Беньофа для коровых землетрясений Сахалинского региона за год и 10 лет (рис. 6).

Как видно из рис. 6 а, в 2022 г. наклон графика для Курило-Охотского региона остается постоянным, примерно соответствующим значению предыдущего года и других «спокойных» лет. В течение года (рис. 6 б) выделяется сейсмическая активизация, связанная с землетрясением 24 апреля, причем ступень на графике существенно больше, чем можно ожидать от события с $M_w = 5.6$. Рой землетрясений на Средних Курилах, частью которого является это землетрясение, а также связанные с ним события, образовавшие небольшую ступень на графике в начале марта, будут рассмотрены ниже.

На графике Беньофа для коровых землетрясений Сахалинского региона за десятилетний период (рис. 6 с) значительной активи-

зацией выделяются 2022 год, сопоставимый с 2016 г., когда произошло сильное Онорское землетрясение $M_w=5.8$ в средней части острова, а также 2013 год, когда, как и в 2022, произошло несколько умеренно-сильных событий в северной и южной частях региона.

На годовом графике (рис. 6 d) наблюдаются ступени наиболее сильных событий ($M_{wa} = 4.6-5.4$), описанных ниже. По сравнению с Курило-Охотским регионом, в Сахалинском даже относительно слабые землетрясения образуют заметную ступень на графике Беньюфа, что обусловлено меньшей сейсмичностью и относительно небольшими размерами региона.

Представленные на рис. 6 графики в применении к большой сейсмоактивной зоне ма-

лопригодны для прогностических целей, за исключением событий максимальной магнитуды, которые при подготовке способны вызвать значительный долговременный спад уровня сейсмичности во всем регионе. Поэтому помимо общих региональных графиков логичнее построить их районные варианты, более полезные на длительных временных промежутках, либо перейти к распределению параметра Беньюфа по площади, что и было сделано.

Величина плотности условной упругой деформации в единицу времени рассчитывалась по формуле

$$e = 1000 \cdot \Sigma E^{1/2} / (S \cdot T), \quad (6)$$

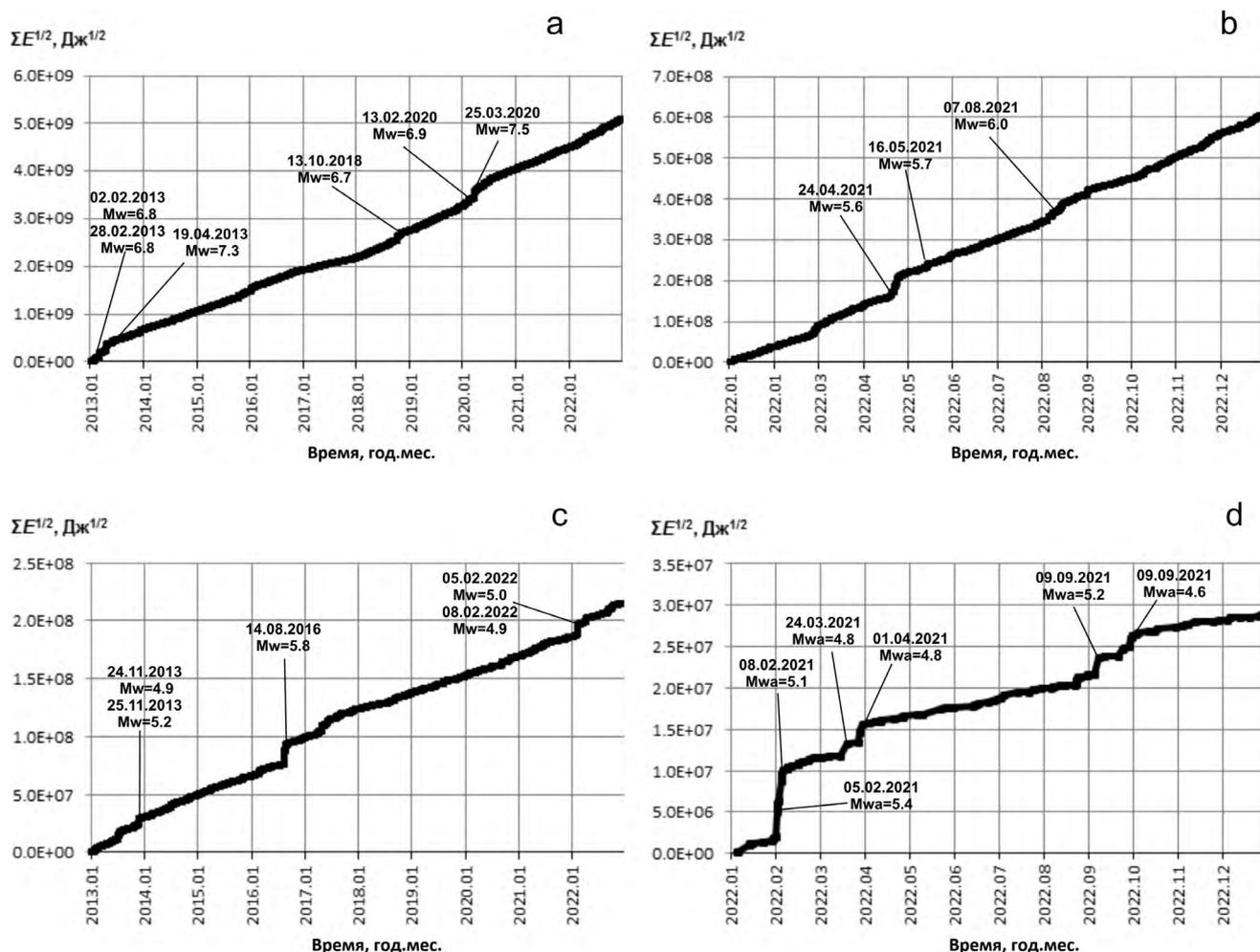


Рис. 6. График Беньюфа для Курило-Охотского региона по данным СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2013–2022 гг. (а) и РИОЦ «Южно-Сахалинск» за 2022 г. (b); для коровых землетрясений Сахалинского региона по данным СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2013–2022 гг. (с) и РИОЦ «Южно-Сахалинск» за 2022 г. (d).

Fig. 6. Benioff diagrams for the Kuril-Okhotsk region by the data of the SB FRC UGS RAS catalogs for 2013–2022 (a) and the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC catalog for 2022 (b); Benioff diagrams for the crustal earthquakes of the Sakhalin region by the data of the SB FRC UGS RAS catalogs for 2013–2022 (c) and the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC catalog for 2022 (d).

где E – энергия землетрясения, Дж; S – площадь поверхности, содержащей эпицентр землетрясения, км²; T – длительность временного отрезка, год. Условная деформация усреднялась на площадке размером $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ скользящим окном с шагом 0.1° и приводилась к площади в 1000 км² (для годовой карты масштаб усреднения по каждой координате удваивался из-за меньшего числа событий). Для сильных ($M \geq 7.5$) землетрясений величина e перераспределялась на примерную площадь их очаговых зон, расположенных в соответствии с расчетными моделями finite fault (USGS. United States Geological Survey. – <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (accessed 31.03.2023)). В отличие от предыдущего обзора [1], в данной статье мы используем более длительные каталоги, потому ввели в расчетную формулу время (31 год). В случае многолетней карты получаемый параметр имеет смысл не плотности условной упругой деформации в пересчете на 1000 км², а средней скорости накопления этого параметра. При построении изолинии дополнительно сглаживались средствами ПО Surfer. На рис. 7 а показана карта распределения величины e в 2022 г., на рис. 7 б – за предшествующий период с 1981 по 2021 г.

Для построения карты распределения e в период с 1981 по 2021 г. на территории Курило-Охотского и Сахалинского регионов использовались каталоги из фондов Геофизической службы, опубликованные в ежегодниках «Землетрясения в СССР», «Землетрясения Северной Евразии», и окончательные варианты каталогов, готовящихся к публикации (2018–2021 гг.). Для региона Северных Курил, входящего в зону ответственности за составление окончательного каталога Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, использованы материалы с официального сайта этой организации (<http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (accessed 31.03.2023)) [15].

Картина распределения параметра e за 30-летний период хорошо согласуется с картиной распределения этого параметра за предыдущие 10 лет [1] и общими представлениями о характере деформирования земной коры и верхней мантии в Курило-Охотском и Сахалинском регионах. Максимальные зна-

чения средней годовой величины условной упругой деформации, составляющие примерно $e = 1-5 \cdot 10^6$ Дж^{1/2}/год на 1000 км², протягиваются полосой между Курильской островной дугой и глубоководным желобом, в основном это результат землетрясений в зоне контакта литосферных плит, в том числе наиболее сильного – Симуширского 2006 г. с $M_w = 8.3$. При этом очаговая зона этого сильнейшего события в районе Средних Курил почти не выделяется на фоне других участков с пиковыми значениями параметра Беньюфа, что при условии прямого толкования этого параметра могло бы говорить в пользу относительно равномерного деформирования зоны контакта плит на 30-летнем интервале. Наибольшие значения $e = 8-12 \cdot 10^6$ Дж^{1/2}/год на 1000 км² находятся на южном фланге Курильской гряды вблизи очаговой зоны Шикотанского землетрясения 1994 г. с $M_w = 8.2$, причем максимальные значения обеспечиваются не столько этим сильнейшим землетрясением, сколько обилием менее сильных событий. По крайней мере на 30-летнем временном отрезке Южные Курилы более сейсмически активны, чем другие участки региона. Минимальные значения e вдоль дуги, которые могут свидетельствовать об областях сейсмического затишья и подготовки сильных землетрясений, расположены в районе о. Симушир юго-западнее очага одноименных землетрясений, северо-восточнее этой очаговой зоны, где особенно выделяется участок ближе к желобу, и в районе среднего Хоккайдо. На охотоморской стороне островной дуги в основном располагаются эпицентры глубоководных землетрясений, так как коровая сейсмичность Охотской плиты довольно слабая. Поле параметра Беньюфа здесь фрагментировано из-за меньшей плотности эпицентров. Максимумы параметра e выделяются очаговые зоны Охотоморских землетрясений 2012 г. с $M_w = 7.7$ и 2013 г. с $M_w = 8.3$ с предшествовавшим ему событием 2008 г. $M_w = 7.7$.

В Сахалинском регионе максимальные значения параметра e связаны с крупнейшими землетрясениями в рассматриваемый 30-летний период: Нефтегорским 1995 г. с $M_w = 7.0$, Углегорским 2000 г. с $M_w = 6.8$ и Невельским 2008 г. с $M_w = 6.2$. Остальные землетрясения несколько теряются на данном фоне, не образуя

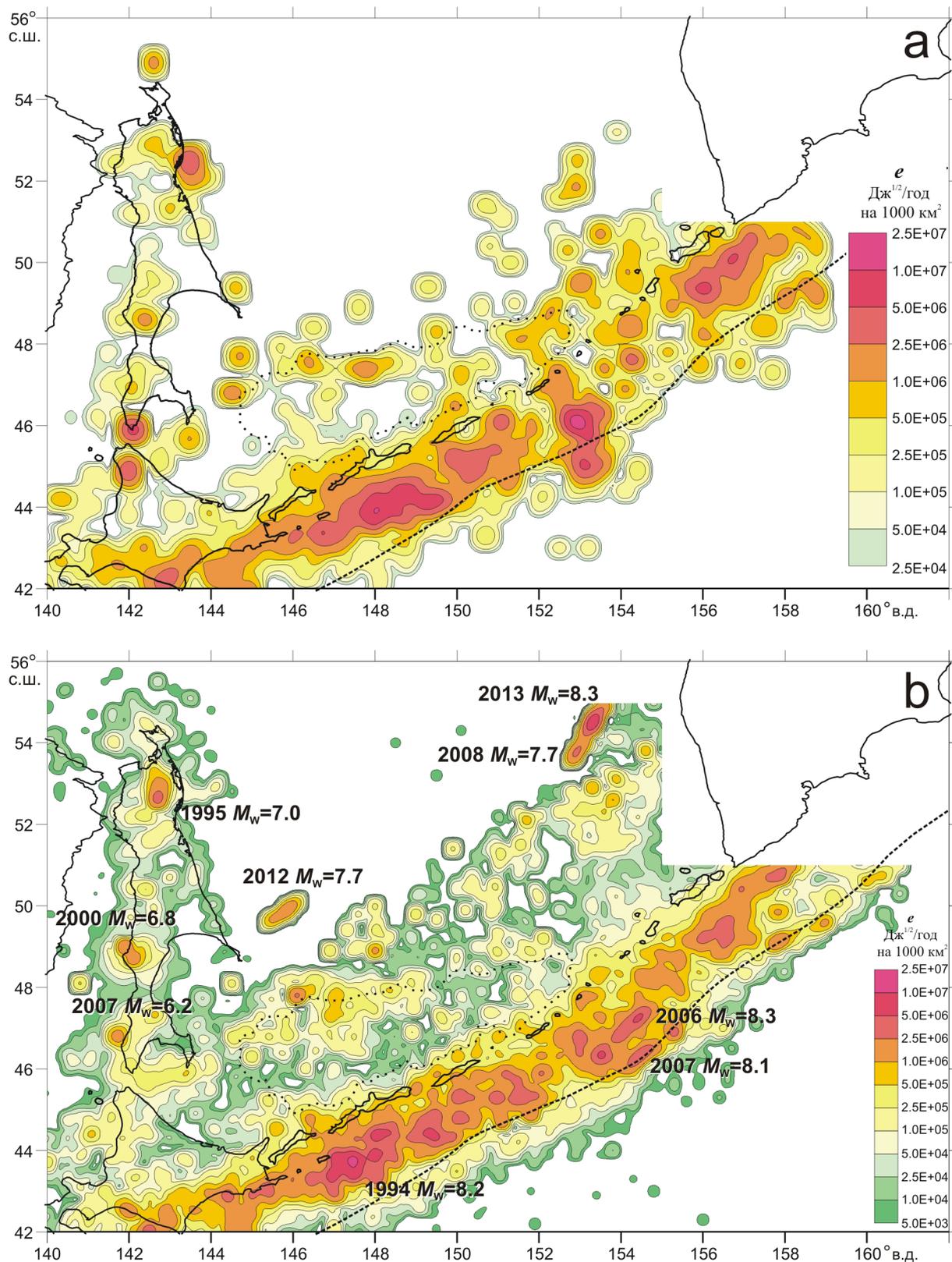


Рис. 7. Плотность условной упругой деформации Сахалинского и Курило-Охотского регионов по данным каталогов РИОЦ «Южно-Сахалинск» 2022 г. (а) и СФ ФИЦ ЕГС РАН 1981–2022 гг. (б). Обозначены наиболее значимые региональные землетрясения. Пунктиром показано положение Курильского глубоководного желоба и Курильской глубоководной котловины.

Fig. 7. Density of conditional elastic deformation of the Sakhalin and Kuril-Okhotsk regions by the data of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC earthquake catalogs in 2022 (a) and the earthquake catalogs of the SB FRC UGS RAS in 1981–2021 (b). The most significant regional earthquakes are marked. The position of the Kuril deep-sea trench and the Kuril deep-sea depression is shown by the dotted line.

общей полосы повышенных значений e , протянувшейся вдоль острова, как это было по данным за более спокойные годы 2012–2021 [1], что является следствием более долгих периодов подготовки сильнейших землетрясений региона, чем в районе Курильской гряды.

В 2022 г. (рис. 7 а) в Курило-Охотском регионе области пиковых значений параметра e , сопоставимых с максимумами средних значений за 31 год, образуют три группы в южной, центральной и северной части гряды, соответствующие положению эпицентров трех сильнейших землетрясений 2022 г. При этом центральная область вытянута вкрест дуге в меридиональном направлении, причина такой ориентации рассмотрена ниже.

Максимальные значения плотности условной упругой деформации, распределенной на площади обоих регионов, близки к ее средним ежегодным величинам. Так как сильное характеристическое землетрясение готовится значительно дольше одного года, все произошедшие в 2022 г. события следует отнести к фоновой сейсмичности.

Обзор сильных землетрясений Приамурья, Приморья, Курило-Охотского и Сахалинского регионов

Как отмечалось выше, в 2022 г. по оперативным данным РИОЦ «Южно-Сахалинск» в регионе *Приамурье и Приморье* зарегистрировано пять коровых землетрясений. Единственное ощутимое (3 балла) событие отмечено 23 мая в 10:38 UTC ($M_{wa} = 3.2$, $H = 10$ км; № 1 в таблице и на рис. 1, 2), колебания почувствовали жители г. Дальнегорск Приморского края. На верхних этажах зданий звенела посуда, падали картины со стен и цветы с подоконников. На нижних этажах событие практически не ощущалось. Согласно оперативному каталогу, эпицентр землетрясения расположен в 20 км от Дальнегорска.

Наиболее сильное землетрясение с гипоцентром в земной коре произошло 28 января в 04:40 ($M_{wa} = 4.8$, $H = 29$ км; № 2 в таблице и на рис. 1) в районе горного хребта Тукурингра западнее Зейского водохранилища в сейсмически активном районе Верхнего Приаму-

рья, где ранее неоднократно регистрировались события магнитудой до $M = 5.0–5.5$, связанные с сейсмичностью Южно- и Северо-Тукурингского разломов.

Эпицентры двух глубокофокусных землетрясений отмечены вблизи побережья Приморья, еще одно – в приграничном районе Китая.

К *Сахалинскому региону* в оперативном каталоге 2022 г. относятся 440 землетрясений, из них 17 мантийных на продолжении Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны (рис. 1). По 15 событиям поступили данные об ошущимости жителями Сахалинской области (рис. 2).

Наиболее сильное по магнитуде коровое землетрясение Сахалинского региона произошло 5 февраля в 21:18 UTC ($M_{wa} = 5.3$, $Mw_{per} = 5.0$, $H = 22$ км; № 3 в таблице и на рис. 1, 2). Эпицентр события расположен на шельфе у северо-восточного побережья о. Сахалин примерно на широте с. Чайво. Моментная магнитуда события по данным GСMT $Mw_{GСMT} = 5.3$, что, вероятно, ближе к реальной величине события. Землетрясение ощущалось в северной части острова, сильные сотрясения отмечены на побережье в поселках и на предприятиях, связанных с добычей углеводородов, а также на расположенных на шельфе буровых платформах. По данным СФ ФИЦ ЕГС РАН, механизм очага землетрясения взбросового типа, событие произошло в условиях диагонального СВ-ЮЗ сжатия, nodальные плоскости падают соответственно на северо-восток под углом $DP = 63^\circ$ и на юго-запад более полого $DP = 27^\circ$. Детальному изучению данного события посвящена статья [16], в которой приведен эпицентр землетрясения по данным локальной сети станций, а также показано облако афтершоков. Землетрясение связано с ранее слабо активным Пильтун-Чайвинским разломом. Показаны параметры реальной и расчетной интенсивности сотрясений и пиковых грунтовых ускорений. Сделан вывод о естественной тектонической природе события, а также дана оценка максимальной магнитуды и периода повторяемости сильных землетрясений для северо-восточного шельфа о. Сахалин.

Интересно также, что на основании изучения афтершоковых процессов других землетрясений Сахалина и отсутствия сильно-

го афтершока первых суток у землетрясения 5 февраля 2022 г. в статье [16] (поступила в редакцию в июне 2022 г.) делается предположение о вероятном повторном землетрясении в том же районе в следующие несколько месяцев. Повторное умеренно-сильное землетрясение с эпицентром примерно в том же районе произошло 1 октября в 04:08 UTC ($M_{wa} = 4.6$, $H = 22$ км; № 7 в таблице и на рис. 1, 2). Событие ощущалось на побережье; в пос. Ноглики и Чайво интенсивность сотрясений оценивается в 3-4 балла.

24 марта в 21:52 UTC в 40 км к югу от эпицентра февральского землетрясения произошло еще одно умеренно-сильное событие ($M_{wa} = 4.8$, $M_{w_{GCMT}} = 4.7$, $H = 5$ км; № 5 в таблице и на рис. 1, 2). Согласно GCMТ, в очаге землетрясения реализовался взброс примерно с теми же параметрами, что и в феврале. В статье [16] это землетрясение также связывается с подвижкой по Пильгун-Чайвинскому разлому и считается спровоцированным перераспределением Кулоновских напряжений после более сильного февральского события. Интенсивность сотрясений, вызванных землетрясением 24 марта, по данным Сахалинского филиала, достигала 3-4 баллов в ближайших поселках.

8 февраля в 22:29 UTC произошло землетрясение в южной половине острова на стыке Углегорского и Макаровского районов ($M_{wa} = 5.1$, $M_{w_{per}} = 4.9$, $H = 14$ км; № 4 в таблице и на рис. 1, 2). Механизм очага надвигового типа с субширотным простиранием нодальных плоскостей: крутой плоскости западного падения ($DP = 74^\circ$) и пологой восточного ($DP = 17^\circ$). Возможно, землетрясение произошло в зоне Западно-Сахалинского разлома, чей сегмент находится в двух десятках километров западнее эпицентра. Вместе с тем, по имеющимся данным, с большей интенсивностью землетрясение ощущалось в поселках восточного побережья острова: в Восточном до 5 баллов, Макарове и Красногорске – 4 балла; на западном побережье – до 3-4 баллов. Поэтому эпицентр землетрясения может оказаться ближе к восточному побережью и являться следствием подвижки по одному из второстепенных разломов, секущих Западно-Сахалинские горы.

9 сентября в 09:01 UTC отмечено землетрясение в Охотском море севернее п-ова Шмидта ($M_{wa} = 5.0$, $M_{w_{per}} = 4.5$, $H = 5$ км; № 5 в таблице и на рис. 1, 2). Этот район интересен тем, что здесь заканчивается Сахалинский пояс сейсмичности, связываемый с границей Амурской и Охотской литосферных плит, о дальнейшем положении этой границы устойчивого мнения пока не сформировано, каждое сильное землетрясение с известным механизмом очага вносит вклад в понимание тектонической обстановки. Согласно данным СФ ФИЦ ЕГС РАН, землетрясение произошло в условиях ВСВ-ЗЮЗ горизонтального сжатия с незначительной сдвиговой компонентой, что близко к представлениям о поле напряжений северо-восточной части Сахалина. Несмотря на удаленность эпицентра, событие ощутили в населенных пунктах севера острова с интенсивностью в 2 балла.

Наиболее сильное по магнитуде землетрясение Сахалинского региона в 2022 г. произошло в мантии с эпицентром в прол. Лаперуза 2 июля в 01:59 UTC ($M_{wa} = 5.9$, $M_{w_{per}} = 6.1$, $H = 323$ км; № 8 в таблице и на рис. 1). Механизм очага взбросо-сдвигового типа с субвертикальной плоскостью юго-восточного простирания и наклоненной на юго-восток под углом $DP = 64^\circ$ плоскостью северо-восточного простирания. Такая ориентация нодальных плоскостей в системе отсчета, связанной с погружающейся Тихоокеанской плитой, соответствует чистому сдвигу и наиболее распространена среди мантийных землетрясений южной части Сахалинского региона [17], при этом одна из возможных плоскостей подвижки совпадает с направлением движения плиты, а вторая ему ортогональна. Возможно, причиной мантийных землетрясений в этой части субдуцирующей плиты являются подвижки по одному или нескольким трансформным разломам.

В *Курило-Охотском регионе* в 2022 г. зарегистрировано 2172 землетрясения, 50 из них вызвали ощутимые колебания на территории Сахалинской области (рис. 2).

Согласно графику Беньофа (рис. 6 б), наиболее значительная сейсмическая активизация в Курило-Охотском регионе в 2022 г. связана с роением землетрясений в районе глубоководно-

го желоба вблизи о. Симушир в средней части Курильской гряды. В течение весны–лета 2022 г. в двух смежных очаговых зонах зарегистрировано семь землетрясений магнитудой $M_{wa} > 5.0$, еще 40 событий с $M_{wa} > 4.0$ и около 50 более слабых (рис. 1, 8). Наиболее сильное землетрясение серии произошло 24 апреля в 01:35 UTC ($M_{w_{per}} = 5.6$, $M_{wa} = 6.0$, $H = 41$ км; № 9 в таблице и на рис. 1). Ощутимых проявлений событий серии в населенных пунктах островов отмечено не было.

Редкая сейсмическая сеть Геофизической службы в районе Курильских островов приводит к значительной погрешности в определении координат гипоцентров землетрясений Средних Курил, потому события серии вытянулись меридионально на расстояние около 200 км (рис. 8). Однако совместное рассмотрение положения эпицентров и механизмов очага позволяет установить, что активизация происходила примерно в одно время в двух, вероятно относительно небольших очаговых зонах: рой умеренно-сильных землетрясений за Курило-Камчатским глубоководным желобом в пределах Тихоокеанской литосферной плиты и серия более сильных землетрясений севернее, с эпицентрами между желобом и островами.

Для наиболее сильного события из первой группы, произошедшего 11 марта в 07:07 UTC ($M_{w_{per}} = 5.0$, $M_{wa} = 5.1$, $H = 42$ км), был определен механизм очага – сбросовой, с нодальными плоскостями, ориентированными вдоль желоба (рис. 8). Такие землетрясения реализуются в условиях растяжения верхней части Тихоокеанской плиты, возникающего из-за ее изгиба.

С 21 апреля началась активизация во втором очаге умеренно-сильным землетрясением в 2:38 UTC ($M_{w_{per}} = 5.0$, $M_{wa} = 5.4$, $H = 22$ км). Затем произошло землетрясение 24 апреля с $M_{wa} = 6.0$ и примерно в том же районе 25 апреля в 05:35 UTC ($M_{w_{per}} = 5.2$, $M_{wa} = 5.5$, $H = 12$ км), а также еще несколько событий. Механизмы очага трех названных землетрясений (рис. 8) классифицированы как сдвиговые с небольшой взбросовой или сбросовой компонентой, при этом одна из нодальных плоскостей ориентирована вкост островной дуге, как и облако эпицентров наиболее круп-

ных землетрясений роя. Небольшая глубина некоторых из зарегистрированных событий позволяет предположить, что землетрясения стали следствием левосторонней сдвиговой сейсмодислокации в аккреционной призме, составляющей фронтальную часть Охотской литосферной плиты. Повышенная сейсмическая активность продолжилась в смежных очаговых зонах в течение весенних-летних месяцев.

Наибольший макросейсмический эффект в 2022 г. вызвало землетрясение, произошедшее в северной части Курильской гряды 16 мая в 05:25 UTC ($M_{wa} = 5.8$, $M_{w_{GCMT}} = 5.6$, $H = 48$ км; № 10 в таблице и на рис. 1, 2). В г. Северо-Курильск интенсивность сотрясений оценивается

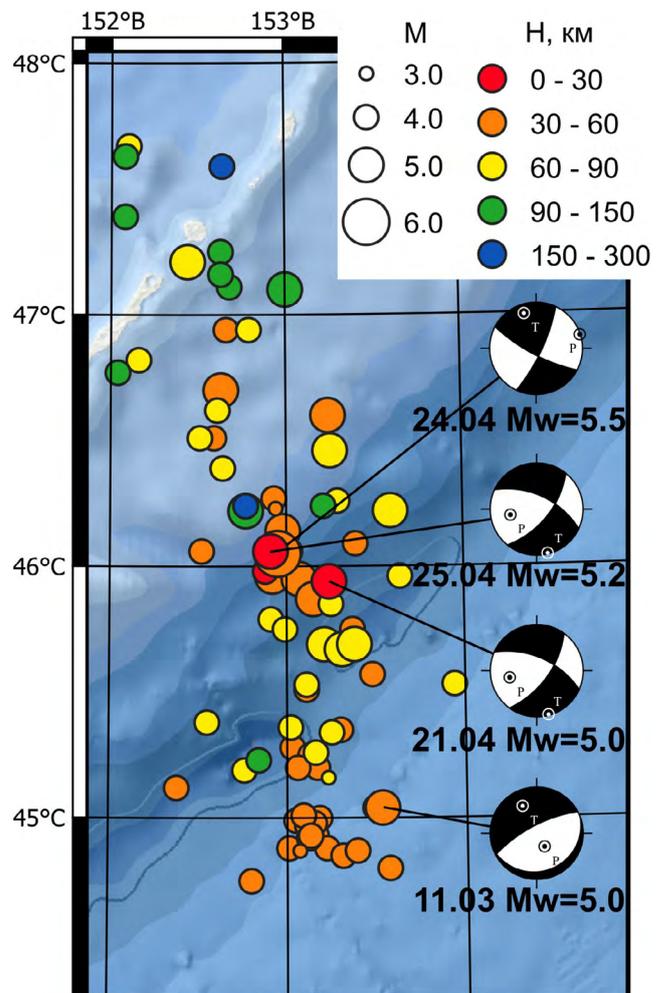


Рис. 8. Землетрясения Средних Курильских островов 2022 г. M – магнитуда; H – глубина гипоцентра. Приведены механизмы очагов, дата и магнитуда землетрясений, упомянутых в тексте.

Fig. 8. Earthquakes of the Middle Kuril Islands in 2022. M – magnitude; H – hypocenter depth, km. Focal mechanisms, date and magnitude of the earthquakes mentioned in the text are given.

в 5 баллов. На рис. 1 показан механизм очага землетрясения (по данным Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН [15]), который интерпретируется как взрез с вертикальной плоскостью меридионального простирания и субгоризонтальной широтного простирания. Такой механизм очага не является обычным для субдукционной системы и требует отдельного изучения, например, по окончательным данным Камчатского филиала, в чьей зоне ответственности за каталог землетрясений это событие произошло.

В южной части Курильской островной дуги наиболее сильным событием в 2022 г. оказалось землетрясение 7 августа в 13:40

UTC ($M_{w\text{рег}} = 6.0$, $M_{\text{wa}} = 6.0$, $H = 59$ км; № 11 в таблице и на рис. 1, 2). Событие ощущалось во всех населенных пунктах юго-западного фланга дуги, интенсивность сотрясений достигала 4-5 баллов. Механизм очага землетрясения классифицируется как сдвиг с левосторонней подвижкой вкост дуги либо правосторонней вдоль дуги. Землетрясение не имело значительной афтершоковой последовательности, потому выделить наиболее вероятную плоскость подвижки на этой основе по оперативным данным нет возможности. Сильные сдвиговые события в пределах субдукционной системы являются более редкими, чем

Таблица. Параметры наиболее значимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН 2022 г. (по оперативным данным РИОЦ «Южно-Сахалинск»)

Table. Parameters of the most significant earthquakes in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2022 (according to the operational data of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC)

№ П/П	Дата / Date	Время / Time t_0	ϕ N	λ E	h , км	$M_{\text{wa}} M_w$	Интенсивность сотрясений (населенный пункт, балл / Shaking intensity (settlement, points))
	day.mth.year	h:min:sec					
Приамурье и Приморье / Amur-Primorye region							
1	23.05.2022	10:38:42	44.6	135.3	2	3.2 -	г. Дальнегорск (Приморский край), 3
2	28.05.2022	04:40:58	54.62	125.16	29	4.8 -	Нет данных об ощутимости
Сахалинский регион / Sakhalin region							
3	05.02.2022	21:18:52	52.47	143.53	22	5.3 5.0	пос. Ноглики, с. Вал, 4; г. Оха, 3; пос. Тунгор, Эхаби, Восточный, 2-3; пос. Некрасовка, Москальво, 2
4	08.02.2022	22:29:02	48.52	142.42	14	5.1 4.9	с. Восточное, 5; пос. Макаров, Красногорск, 4; г. Углегорск, пос. Поречье, Томари, Ильинское, Краснополье, 3-4; Шахтерск, 3
5	24.03.2022	21:52:29	52.09	143.56	5	4.8 -	с. Горячие Ключи, 4; г. Ноглики, 3; с. Вал, 2-3; с. Ныш, 2
6	09.09.2022	09:01:51	54.81	142.63	10	5.0 4.5	г. Оха, пос. Некрасовка, Москальво, 2
7	01.10.2022	04:08:21	52.49	143.48	10	4.6 -	пос. Ноглики, Чайво, 3-4; с. Вал, 2-3; г. Александровск-Сахалинский, 2
8	02.07.2022	01:59:45	45.81	142.12	323	6.1 5.9	Нет данных об ощутимости
Курило-Охотский регион / Kuril-Okhotsk region							
9	24.04.2022	01:35:02	46.05	152.95	41	6.0 5.6	Нет данных об ощутимости
10	16.05.2022	05:25:52	50.18	156.85	48	5.8 -	г. Северо-Курильск, 5 (Сахалинская обл.)
11	07.08.2022	13:40:42	43.69	148.08	59	6.0 6.0	пос. Южно-Курильск, Лагунное, Горячий Пляж, Головнино, Малокурильское, Крабовозовское, Горячие Ключи, Горный, 4-5; г. Курильск, с. Рейдово, 4 (Сахалинская обл.)
12	10.08.2022	15:53:00	44.86	142.04	11	5.2 5.2	о. Хоккайдо, Япония, до 5+ по шкале JMA*

* <https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2022/08/11/2022-08-11-00-53-02.html>

взбросовые, и могут пролить свет на вопросы фрагментации зоны субдукции и размеров возможных очаговых зон катастрофических землетрясений, а потому важны для изучения.

Еще одно интересное умеренно-сильное событие 2022 г. произошло в земной коре в северной части о. Хоккайдо, Япония, 10 августа в 15:53 UTC ($M_{w\text{ per}} = 5.2$, $M_{wa} = 5.2$, $H = 11$ км; № 12 в таблице и на рис. 1). Землетрясение ощущалось на о. Хоккайдо; по данным ЖМА, интенсивность сотрясений достигала 5 баллов шкалы ЖМА. Землетрясение явилось следствием взброса с небольшой сдвиговой компонентой в условиях субширотного сжатия с примерно одинаковым наклоном нодальных плоскостей к востоку-юго-востоку и западу-юго-западу, однако ориентация афтершокового облака, вытянутого примерено в ЮЗ-СВ направлении, позволяет предположить, что подвижка произошла вдоль плоскости ВЮВ падения. Земная кора севера о. Хоккайдо составляет с южной частью о. Сахалин единую складчатую систему, потому изучение землетрясений в земной коре этого региона представляет интерес для исследователей общей тектоники островов.

Заключение

В оперативный каталог 2022 г., составленный по данным РИОЦ «Южно-Сахалинск», вошло 2172 землетрясения Курило-Охотского региона, 443 – Сахалинского региона, 8 землетрясений Приамурья и Приморья.

Малое количество землетрясений Приамурья и Приморья объясняется относительно слабой сейсмичностью региона, а также уменьшающимися возможностями сети СФ ФИЦ ЕГС РАН по регистрации здесь землетрясений в оперативном режиме. Количество станций филиала в этом регионе, передающих данные в РИОЦ в режиме реального времени, а потому доступных для составления оперативного каталога, к концу 2022 г. сократилось до четырех. С учетом уменьшения числа доступных станций других организаций в регионе, регистрация слабых событий здесь становится затруднительной, что приводит к значительной погрешности при определении параметров землетрясений.

По формальному признаку СОУС'09 в 2022 г. сейсмичность всех трех регионов остается в пределах фонового уровня. Для Сахалинского региона уровень коровой сейсмичности фоновый средний, но вблизи верхней границы этого диапазона глубоководная сейсмичность находится на повышенном фоновом уровне. В Курило-Охотском регионе уровень сейсмичности вблизи границы среднего и пониженного фонового, примерно соответствует уровню прошлого года.

Отмечено несоответствие статистической оценки СОУС'09 за 2021 г., сделанной в предыдущем обзоре по оперативным данным [1] и в нынешнем обзоре по окончательному каталогу СФ ФИЦ ЕГС РАН для Сахалинского региона и региона Приамурья и Приморья. Основная причина расхождений – в используемых пересчетных формулах для перехода от магнитуд M_{SHA} и M_{PVA} к расчетной магнитуде M^P . Используемые формулы 1978 г. дают сильно заниженные оценки для слабых и умеренно-сильных событий и нуждаются в пересмотре.

Получена карта распределения условной упругой деформации e (по Беньофу) по площади Сахалинского и Курило-Охотского регионов для 2022 г. Для сравнения приводится карта средней скорости накопления этого параметра в 1981–2021 гг. В 2022 г. в Курило-Охотском регионе пиковые значения параметра e расположены в южной, центральной и северной частях гряды тремя группами, соответствующими положению эпицентров трех сильнейших сейсмических активизаций 2022 г. При этом центральная область вытянута вкрест дуге в меридиональном направлении, так как в этом районе весной–летом 2022 г. происходили параллельно два роя землетрясений. Предполагается, что первый из них, с M_w до 5.6, связан со сбросовыми событиями на изгибе Тихоокеанской плиты в районе глубоководного желоба, а второй, с M_w до 5.0, – с левосторонней сдвиговой сейсмодислокацией во фронтальной части Охотской литосферной плиты. Наиболее сильное землетрясение Курило-Охотского региона с $M_w = 6.0$ произошло в южной части Курильской островной дуги. Отмечены также землетрясения с $M_{wa} = 5.8$ на севере Курил с максимальной для 2022 г. зарегистриро-

ванной интенсивностью в 5 баллов и коровое событие с $M_w = 5.2$ на Хоккайдо.

В Сахалинском регионе отмечена сейсмическая активизация на северо-восточном шельфе, проявившаяся в ряде умеренно-сильных (M_w до 5.0) событий. Несколько более слабые, но также заметные для региона землетрясения зарегистрированы к северу от п-ова Шмидта, к востоку от п-ова Терпения и в Углегорском районе. Наиболее сильным в 2022 г. стало мантийное событие с эпицентром в прол. Лаперуза с $M_w = 5.9$.

Список литературы

- Сафонов Д.А., Семенова Е.П. **2022**. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2021 году. *Геосистемы переходных зон*, 6(2): 85–99. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.085-099>
- Sokos E., Zahradník J. **2013**. Evaluating centroid moment tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*, 84: 656–665. <https://doi.org/10.1785/0220130002>
- Сафонов Д.А., Коновалов А.В. **2017**. Использование программы ISOLA для определения тензора сейсмического момента землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов. *Тихоокеанская геология*, 36(3): 102–112. URL: http://itig.as.khb.ru/POG/2017/n_3/PDF_3_17/102-112.pdf
- Костылев Д.В. **2021**. Формирование единой системы сбора сейсмологической информации в Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН. *Российский сейсмологический журнал*, 3(1): 41–53. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.03>
- Richter C.F. **1958**. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н. **1990**. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки. *Вулканология и сейсмология*, 6: 55–63.
- Салтыков В.А. **2011**. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки. *Вулканология и сейсмология*, 2: 53–59.
- Поплавская Л.Н. (ред.) **2006**. *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с.
- Ким Ч.У., Андреева М.Ю. **2009**. *Каталог землетрясений Курило-Камчатского региона (1737–2005 гг.)*. Препринт. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 126 с.
- Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Коваленко Н.С. **2019**. *Сейсмичность региона Приамурье и Приморье*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 104 с.
- Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. **1967**. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой Курильских землетрясений. *Физика Земли*, 2: 13–23.
- Соловьева О.Н. **1978**. Определение магнитуды глубокофокусных землетрясений. *Физика Земли*, 1: 25–35.
- 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>
- Benioff H. **1951**. Earthquakes and rock creep: (Part I: Creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks). *Bull. of the Seismological Society of America*, 41(1): 31–62. <https://doi.org/10.1785/bssa0410010031>
- Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Matveenko E.A., Chebrov D.V. **2020**. Seismological data information system in Kamchatka branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions. *Geophysical Research*, 21(3): 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
- Коновалов А.В., Степнова Ю.А., Степнов А.А. **2023**. Сильное землетрясение 05.02.2022 (ML 5.5) вблизи нефтегазового месторождения на северо-восточном шельфе о. Сахалин. *Тихоокеанская геология*, 20(1): 60–75. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-1-60-75>
- Safonov D.A., **2020**. Reconstruction of the tectonic stress field in the deep parts of the Southern Kuril-Kamchatka and Northern Japan subduction zones. *Geodynamics & Tectonophysics*, 11(4): 743–755. doi:10.5800/GT-2020-11-4-0504

References

- Safonov D.A., Semenova E.P. **2022**. Seismicity of the South Far East of Russia in 2021. *Geosistemy perednykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 6(2): 85–99. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.085-099>
- Sokos E., Zahradník J. **2013**. Evaluating centroid-moment-tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*, 84: 656–665. <https://doi.org/10.1785/0220130002>
- Safonov D.A., Konovalov A.V. **2017**. Moment tensor inversion in the Kuril-Okhotsk and Sakhalin regions using ISOLA software. *Tikhookeanskaya geologiya*, 36(3): 102–112. (In Russ.). URL: http://itig.as.khb.ru/POG/2017/n_3/PDF_3_17/102-112.pdf
- Kostylev D.V. **2021**. Formation of a unified system for collecting seismological information in the Sakhalin Division GS RAS. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal = Russian J. of Seismology*, 3(2): 41–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.03>
- Richter C.F. **1958**. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.
- Gusev A.A., Mel'nikova V.N. **1990**. Relations between magnitudes: global and Kamchatka data. *Volcanology and Seismology*, 6: 55–63. (In Russ., abstr. in Engl.).
- Saltykov V.A. **2011**. A statistical estimate of seismicity level: The method and results of application to Kam-

- chatka. *J. of Volcanology and Seismology*, 5: 123–128. <https://doi.org/10.1134/S0742046311020060>
8. Poplavskaya L.N. (ed.) **2006**. [*Regional catalog of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005*]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 103 p. (In Russ.).
 9. Kim Ch.U., Andreeva M.Yu. **2009**. [*Earthquake catalog of the Kuril-Kamchatka region (1737–2005)*]. Preprint. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 126 p. (In Russ.).
 10. Safonov D.A., Nagornyh T.V., Kovalenko N.S. **2019**. *Seismicity of the Amur and Primorye regions*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG FEB RAS, 104 p. (In Russ., abstr. in Engl.).
 11. Solov'eva O.N., Solov'ev S.L. **1967**. Relationship connecting energy class and magnitude for the Kuril Is. earthquakes. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 2: 13–23. (In Russ.).
 12. Solov'eva O.N. **1978**. Determining the magnitudes of deep-focus earthquakes. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 1: 25–35. (In Russ.).
 13. 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>
 14. Benioff H. **1951**. Earthquakes and rock creep: (Part I: Creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks). *Bull. of the Seismological Society of America*, 41(1): 31–62. <https://doi.org/10.1785/bssa0410010031>
 15. Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Matveenko E.A., Chebrov D.V. **2020**. Seismological data information system in Kamchatka branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions. *Geophysical Research*, 21(3): 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
 16. Konovalov A.V., Stepnova Yu.A., Stepnov A.A. **2023**. A strong earthquake on February 5, 2022 (ML 5.5) near a petroleum deposit on the northeastern shelf of Sakhalin Island. *Russian J. of Pacific Geology*, 17(1): 54–67. <https://doi.org/10.1134/s1819714023010049>
 17. Safonov D.A. **2020**. Reconstruction of the tectonic stress field in the deep parts of the Southern Kuril-Kamchatka and Northern Japan subduction zones. *Geodynamics & Tectonophysics*, 11(4): 743–755. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0504>

Об авторах

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, d.safonov@imgg.ru

Семенова Елена Петровна (<https://orcid.org/0000-0002-7435-961X>), начальник сейсмической станции «Южно-Сахалинск», Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, semenova@seismo.sakhalin.ru

About the Authors

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, d.safonov@imgg.ru

Semenova, Elena P. (<https://orcid.org/0000-0002-7435-961X>), Chief of the Seismic station «Yuzhno-Sakhalinsk», Sakhalin Branch of the Federal Research Center “United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”, Yuzhno-Sakhalinsk, semenova@seismo.sakhalin.ru

Поступила 16.04.2023

Принята к публикации 12.07.2023

Received 16 April 2023

Accepted 12 June 2023