

© Авторы 2022 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2022. 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/gtrz.2022.6.2.085-099>
<https://www.elibrary.ru/puhfwt>

Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2021 году

Д. А. Сафонов^{*1}, Е. П. Семёнова²

*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

Реферат. В работе представлен обзор сейсмичности в 2021 г. южной части Дальнего Востока России: регионов Приамурье и Приморье, Сахалинского и Курило-Охотского, основанный на данных каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН». Приведены регрессионные соотношения между энергетическими характеристиками землетрясений каталога. Рассчитаны основные параметры сейсмичности: статистическая оценка уровня сейсмичности СОУС'09, графики Бенъофа, карты плотности условной упругой деформации; приведена информация о наиболее значимых землетрясениях в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН. По формальным показателям сейсмичность названных регионов в 2021 г. находилась в пределах фоновых значений. Магнитуда сильнейшего из зафиксированных в каталоге 2021 г. землетрясения, произошедшего 20 сентября в пределах Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны на глубине 41 км, составила $M_W = 6.1$. Самое сильное коровое землетрясение Сахалинского региона с $M_{wa} = 4.4$ произошло 18 апреля вблизи пос. Тымовское, где вызвало сотрясения интенсивностью в 5-6 баллов.

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

Seismicity of the South Far East of Russia in 2021

Dmitry A. Safonov^{*1}, Elena P. Semenova²

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

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

²Sakhalin Branch of the FRC "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences", Yuzhno-Sakhalinsk

Abstract. The paper presents an overview of the seismicity of the southern part of the Russian Far East for 2021: Amur-Primorye region, Sakhalin and Kuril-Okhotsk region. It is based on 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». Regression relationships between the energy characteristics of earthquakes in the catalog are given. The main parameters of seismicity are estimated: statistical estimation of seismicity level SESL'09; Benioff diagrams; density maps of conditional elastic deformation. The information about the most significant earthquakes in the responsibility zone of the SF FRC UGS RAS is given. According to formal indicators, the seismicity of these regions in 2021 was within the background values. The magnitude of the strongest earthquake recorded in the catalog of 2021, which occurred on September 20 within the Kuril-Kamchatka seismofocal zone at a depth of 41 km, was $M_W = 6.1$. The strongest crustal earthquake in the Sakhalin region with $M_{wa} = 4.4$ occurred on April 18 near the settlement of Tymovskoe, where it was felt with an intensity of 5-6 points.

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 2021 году. *Геосистемы переходных зон*, 2022 т. 6, № 2, с. 85–99. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.085-099>; <https://www.elibrary.ru/puhfwt>

For citation: Safonov D.A., Semenova E.P. Seismicity of the South Far East of Russia in 2021. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 85–99. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.085-099>; <https://www.elibrary.ru/puhfwt>

Введение

Статья продолжает ежегодный обзор сейсмичности территории юга Дальнего Востока России на основе оперативных определений па-

раметров зарегистрированных землетрясений в Сахалинском филиале Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) в 2021 г. [1–3].

Областью исследования являются Курило-Охотский регион (Курильские острова, о. Хоккайдо, прилегающие к ним акватории северо-западной части Тихого океана, Охотского и Японского морей); Сахалинский регион (о. Сахалин и Татарский пролив); регион Приамурье и Приморье (территория Приморского и Хабаровского краев, Амурской и Еврейской автономной областей, а также приграничные районы Китая и прибрежная часть Японского моря).

Цель работы – представить информацию о сейсмичности южной части Дальнего Востока РФ по оперативным данным. Статья обращает внимание на наиболее интересные и заслуживающие изучения сейсмические события прошлого года, приводит основные параметры сейсмичности в сравнении с предыдущим десятилетием.

Основным отличием данной работы от предыдущих обзоров является переход к использованию нового источника оперативных данных о параметрах землетрясений. С 2021 г. в СФ ФИЦ ЕГС РАН подготовку данных для составления оперативного каталога Приамурья и Приморья, Сахалинского и Курило-Охотского регионов выполняет региональный информационно-обрабатывающий центр (РИОЦ) «Южно-Сахалинск». Объем оперативного каталога значительно возрос, а параметры землетрясений неплохо коррелируют с данными международных сейсмологических агентств. Более подробный анализ качества обработки данных РИОЦ «Южно-Сахалинск» можно найти в отчетах НИР ФИЦ ЕГС РАН¹.

Получаемые параметры землетрясений в РИОЦ «Южно-Сахалинск» имеют определенные отличия от данных оперативного каталога отдела сводной обработки сейсмологических данных, использованного ранее при составлении ежегодных обзоров. В частности, помимо известных и давно применяемых для различных регионов России энергетических характеристик землетрясений [4], в оперативном каталоге РИОЦ широко используется магнитуда M_{wa} . Магнитуда на основе цифровой эмуляции

записи сейсмографа Wood-Anderson M_{wa} является старейшей и хорошо зарекомендовавшей себя энергетической характеристикой [5, 6], однако в практике обработки землетрясений в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН применяется сравнительно недавно. Поэтому в статье приведены межмагнитудные соотношения, полученные на основе данных каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН, необходимые для дальнейшего обзора сейсмичности регионов.

Обзор сейсмичности приводится с использованием основных характеристик: статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09, графиков Беньюфа. Для демонстрации пространственного распределения сейсмической активности приведены карты плотности условной упругой деформации.

Сеть сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2021 г. по сравнению с предыдущими годами практически не претерпела изменений [2]. К концу 2021 г. сеть сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН насчитывала 48 пунктов непрерывных наблюдений: 38 стационарных, в том числе 18 с обслуживающим персоналом и 20 автоматических, с передачей данных в реальном времени на серверы сбора опорных станций; 10 автономных полевых локальной сети на юге о. Сахалин.

В апреле 2021 г. были установлены два пункта сейсмологических наблюдений в районе активной добычи угля на Солнцевском угольном разрезе (Углегорский район Сахалинской области). Это дает возможность с повышенной точностью контролировать проводимые взрывные работы, а также слабую и возможную наведенную сейсмичность, сформировавшуюся вследствие постоянного техногенного воздействия на недра [7].

Текущая конфигурация сети сейсмических станций, с учетом установленного оборудования и привлечения в оперативном режиме данных со станций Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН и Глобальной сейсмической сети (GSN), позволяет обеспечить на большей части зоны ответственности возможность ре-

¹ Чебров Д.В. (науч. рук.) 2021. Анализ волновых полей сильных землетрясений и параметров их очагов в целях уточнения цунамигенного потенциала при обработке данных системы предупреждения о цунами: отчет о НИР (итоговый). ФИЦ ЕГС РАН. Обнинск, 91 с. № ГР АААА-А19-119031590060. [Chebrov D.V. (scientific director) 2021. Analiz volnovykh polej sil'nykh zemletryasenij i parametrov ih ochagov v celyah utochneniya cunamigennogo potenciala pri obrabotke dannyh sistemy preduprezhdeniya o cunami [Analysis of the wave fields of strong earthquakes and the parameters of their foci in order to clarify the tsunami potential when processing data from the tsunami warning system]: research report (final). FRC UGS RAS. Obninsk, 91 p. (In Russ.).]

гистрации землетрясений начиная с магнитуды $M_{min} = 3.0$. Исключение составляют центральная часть Охотского, северная часть Японского моря, район Средних Курильских островов и приграничная часть Приамурья, где представительной можно считать магнитуду событий $M_{min} = 3.5$. Благодаря более плотной сети сейсмостанций, а также доступу к короткопериодным станциям Хоккайдского университета, на части Южных Курил и территории Сахалинского региона порог уверенной регистрации составляет $M_{min} = 2.5$ [8].

Магнитудные соотношения

Определение магнитуды M_{wa} в качестве энергетической характеристики было введено в практику обработки сейсмологических данных РИОЦ «Южно-Сахалинск» в 2014 г. и первоначально носило эпизодический характер. С 2017 г. число определений M_{wa} постепенно росло, и к концу 2021 г. их количество составило 12 262 для землетрясений с эпицентрами на Дальнем Востоке. M_{wa} определяется для всех землетрясений на эпицентральных расстояниях до 1600 км и для всего диапазона глубин, являясь, таким образом, самой массовой энергетической характеристикой землетрясений в каталоге

Для обработки землетрясений в РИОЦ «Южно-Сахалинск» используется программный комплекс DIMAS [9], процедуры которого позволяют на основе цифровых записей эмулировать сейсмограмму, соответствующую характеристикам сейсмографа Wood-Anderson. При расчете M_{wa} используется максимальное смещение грунта на горизонтальной составляющей с применением функции затухания в соответствии с [5, 6]:

$$M = \lg A_{\max} + 2.56 \lg \Delta - 1.67, \quad (1)$$

где Δ – эпицентральное расстояние в километрах. Рекомендуемый диапазон применения магнитудной шкалы – 10–600 км от эпицентра, однако фактически магнитуда определяется для всех региональных эпицентральных расстояний. Определение магнитуды для глубокофокусных землетрясений, вплоть до событий с глубиной гипоцентра в 600 км, также прак-

тикуется, при этом преимущественно учитываются удаленные станции на эпицентральной дистанции, превышающей глубину. В условиях разреженной региональной сети юга Дальнего Востока России таких станций большинство.

Поскольку магнитуда M_{wa} в практике обработки землетрясений в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН является новой, было проведено исследование границ ее применимости и связи с другими широко используемыми энергетическими характеристиками землетрясений. Результаты готовятся к публикации. В данной работе приведены основные выводы, необходимые для дальнейшего обзора сейсмичности регионов.

Соотношение между магнитудой M_{wa} и энергетическим классом Т.Г. Раутиан K_p , также массово определяемым РИОЦ «Южно-Сахалинск» для землетрясений Сахалина и континентальной части зоны ответственности, было получено методом ортогональной стандартной регрессии (OSR) на основе данных о 310 коровых сахалинских землетрясениях в период наблюдений 2017–2021 гг. (рис. 1 а). Здесь и далее использовались данные о землетрясениях, для которых в определении локальной магнитуды M_{wa} было задействовано не менее 4 сейсмических станций, допуски для коэффициентов регрессионных соотношений приведены для доверительного интервала в 95 %. Формулу предполагается использовать для диапазона магнитуд 1.0–4.5:

$$K_p = 1.54(\pm 0.07) M_{wa} + 4.68(\pm 0.19). \quad (2)$$

По причине малого количества ежегодных определений моментной магнитуды $M_{W(per)}$, получаемой в СФ ФИЦ ЕГС РАН совместно с ИМГиГ ДВО РАН при расчете тензора сейсмического момента центроида региональных землетрясений, регрессионное соотношение $M_{wa}/M_{W(per)}$ пока не получено. Однако удалось оценить связь магнитуды M_{wa} с магнитудой M_W агентства NIED² (Япония) в диапазоне магнитудных значений 3.5–6.0 (рис. 1 б).

Точность определения моментных магнитуд σ_w^2 примерно втрое превосходит точность магнитуд по амплитуде сейсмических волн σ_b^2 , поэтому расчет производился методом

² NIED. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan. URL: <http://www.fnet.bosai.go.jp> (accessed 1.02.2022).

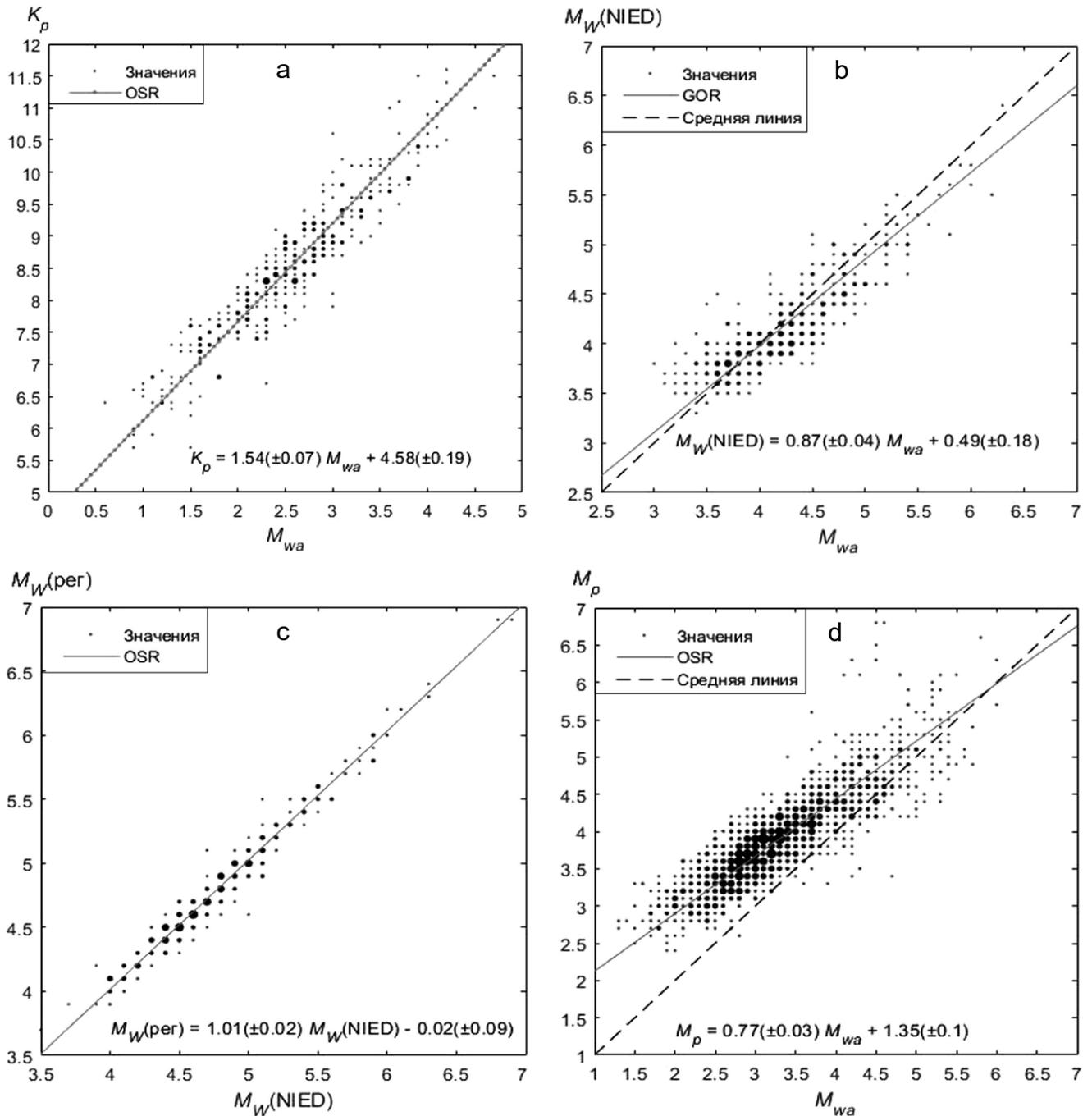


Рис. 1. Регрессионные соотношения между различными энергетическими характеристиками землетрясений, применяемыми в практике обработки землетрясений в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН (по данным 2017–2021 гг.): (а) – между магнитудой M_{wa} и энергетическим классом K_p на основе данных РИОЦ «Южно-Сахалинск»; (б) – между магнитудами M_{wa} РИОЦ «Южно-Сахалинск» и M_W агентства NIED; (с) – между магнитудами $M_{W(per)}$ СФ ФИЦ ЕГС РАН и M_W агентства NIED; (д) – между магнитудами M_{wa} и расчетной M_p СФ ФИЦ ЕГС РАН. Размер точек пропорционален количеству пар значений.

Fig. 1. Regression relationships between various energy characteristics of earthquakes used in the practice of earthquake processing in the SB FRC UGS RAS responsibility zone (according to the data of 2017–2021): (a) – between the magnitude M_{wa} and energy class K_p based on the data of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC; (b) – between the magnitudes M_{wa} by the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC and M_W by the NIED Agency; (c) – between the magnitudes $M_{W(per)}$ by the SB FRC UGS RAS and M_W by the NIED Agency; (d) – between the magnitudes M_{wa} and estimated M_p by the SB FRC UGS RAS. The size of the dots is proportional to the number of paired values.

генеральной ортогональной регрессии (GOR) с отношением дисперсии магнитудных определений $\eta = \sigma_w^2 / \sigma_b^2$ как 1/3. Использовались

472 магнитудные пары всего диапазона региональных глубин. Отдельно получены соотношения для землетрясений глубиной гипоцент-

тра до 60 и свыше 60 км, которые не показали значительных (за пределами доверительного интервала) различий в регрессионных коэффициентах и потому не приводятся. Этот результат подтверждает применимость магнитуды M_{wa} для региональных землетрясений любой глубины.

$$M_{W(NIED)} = 0.87(\pm 0.04) M_{wa} + 0.49(\pm 0.18). \quad (3)$$

Поскольку оценки $M_{W(per)}$ доступны с 2012 г., т.е. за более длительный период, чем для M_{wa} , было проведено ее сопоставление с $M_{W(NIED)}$. Использованы данные о 308 землетрясениях преимущественно южной части Курило-Охотского региона. Как показывает график на рис. 1 с, эти магнитуды практически идентичны, а потому формулу (3) можно применять и для перехода между $M_{W(per)}$ и M_{wa} , по крайней мере внутри магнитудного диапазона $M = 4.0-6.0$.

Ранее в обзорах региональной сейсмичности [1–3] в качестве базовой для описания сейсмичности использовалась магнитуда по поверхностной волне M_{LH} . Как правило, эта магнитуда может быть качественно определена для сильных неглубокофокусных землетрясений, из-за малого количества таких определенных переходное соотношение от нее к магнитуде M_{wa} получить пока не удалось, требуется более длительный период наблюдений. Ранее к магнитуде M_{LH} по переходным формулам [4] приводились более массовые энергетические характеристики, принятые для регионов зоны ответственности СФ. Полученная подобным подходом магнитуда в каталогах ГС РАН получила обозначение – расчетная магнитуда M_p . На рис. 1 d показано соотношение M_{wa} и расчетной магнитуды M_p на основе 1688 магнитудных пар за период 2017–2020 гг. для Курило-Охотского региона.

Очевиден огромный разброс значений, особенно для больших магнитуд, возникающих, вероятно, из-за некорректного применения переходных соотношений между магнитудными шкалами за пределами диапазона их применимости. Именно поэтому в обзоре прошлого года [3] мы заменили для сильных ($M \geq 5.0$ для региона Сахалин и $M > 5.5$ для Курило-Охотского региона) землетрясений

расчетную магнитуду M_p на M_w . Тем не менее большее число данных позволило получить устойчивую зависимость M_{wa}/M_p . Соотношение (4) позволит сохранить определенную преемственность данных с обзорами прошлых лет для диапазона магнитуд 2.0–6.0.

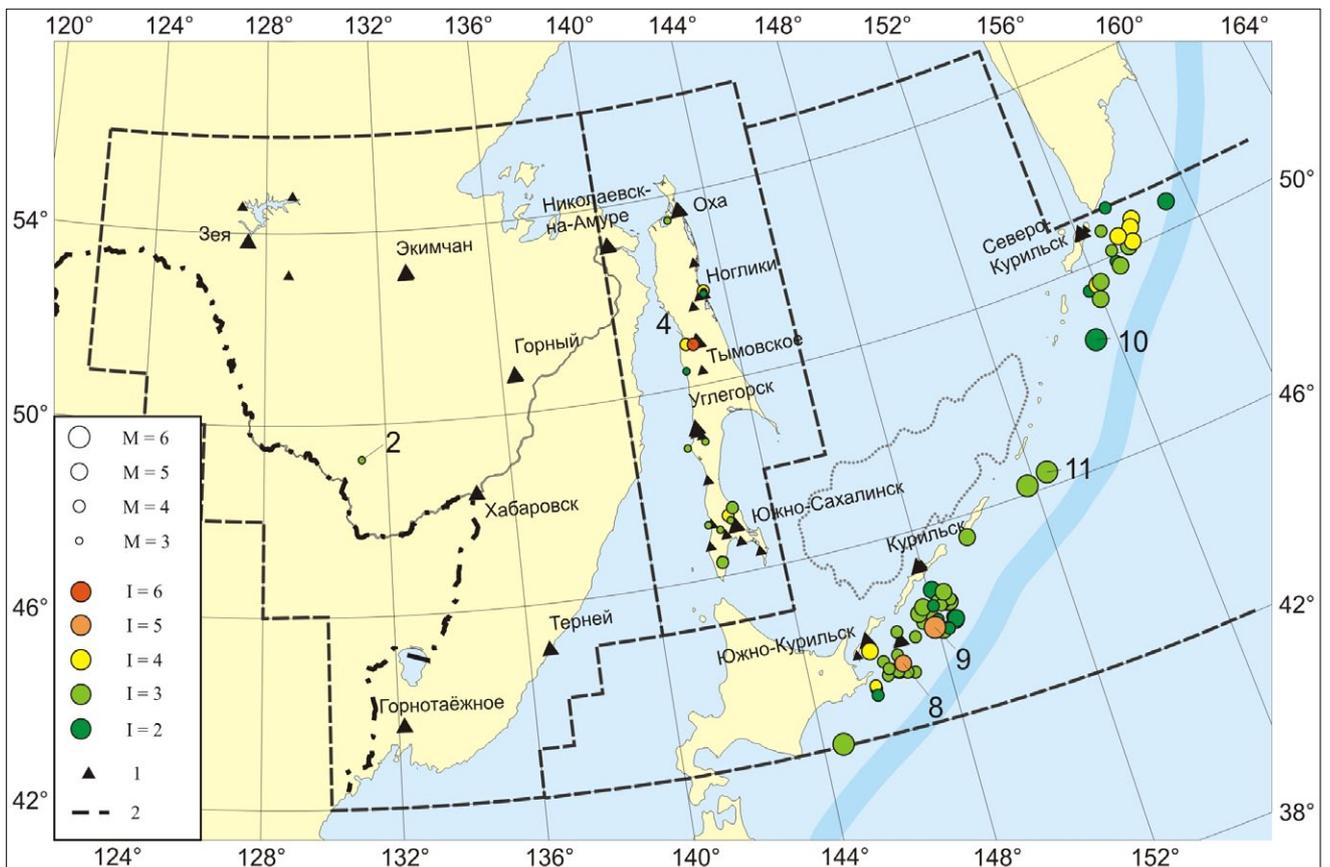
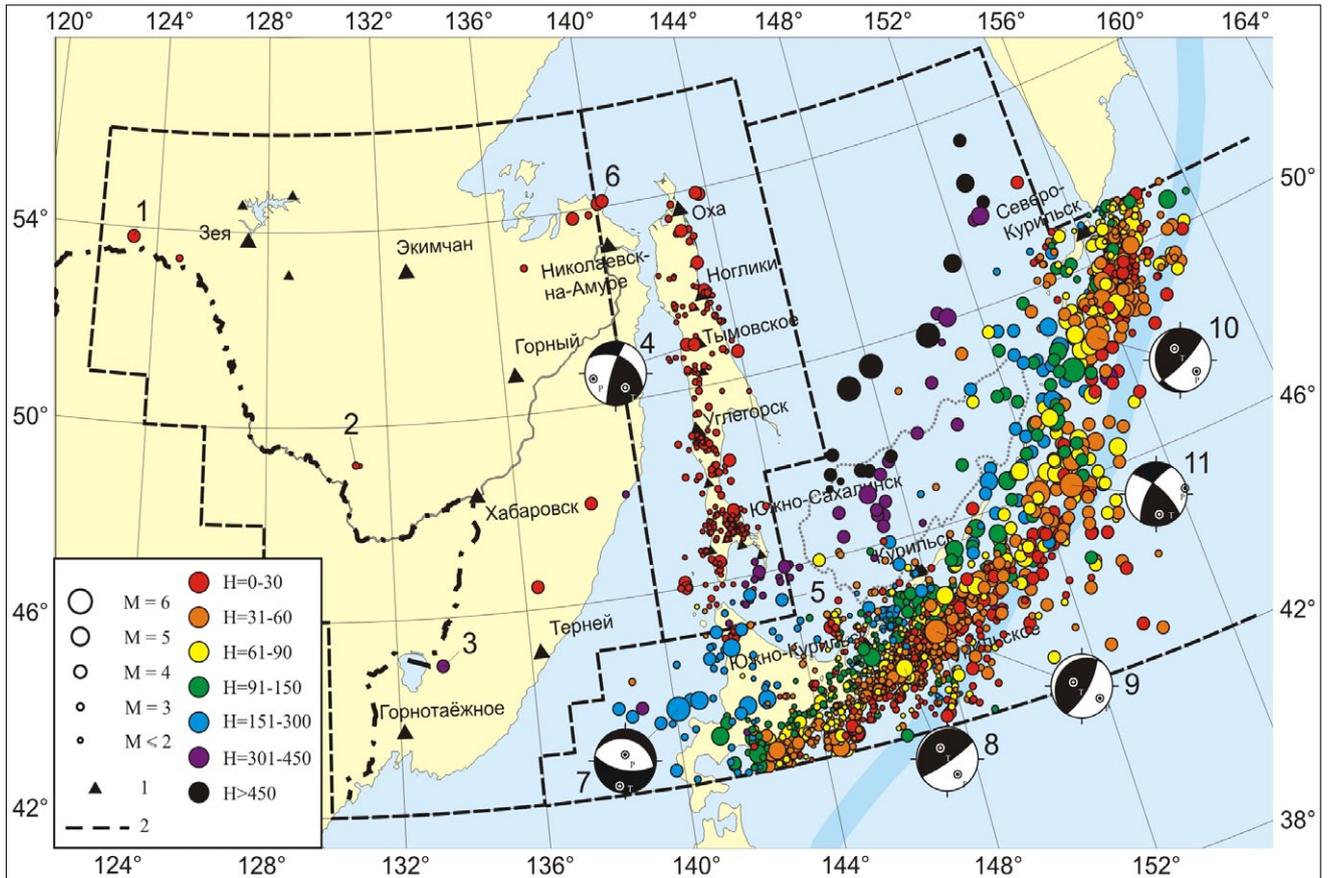
$$M_p = 0.77(\pm 0.03) M_{wa} + 1.35(\pm 0.10). \quad (4)$$

В каталог РИОЦ «Южно-Сахалинск» входят все зарегистрированные землетрясения, включая события, лоцированные по одной станции. Для оперативного анализа сейсмичности подобные землетрясения не использовались. В качестве основной энергетической характеристики принята магнитуда M_{wa} как наиболее массовая. При построении карт (рис. 2, 3) для землетрясений с $M_{wa} > 5.8$ ее значение заменялось на $M_{W(per)}$, поскольку для больших значений магнитуд M_{wa} в пределах рассматриваемой территории все еще недостаточно изучена. Для нескольких землетрясений Сахалинского региона магнитуда M_{wa} в каталоге РИОЦ оказалась не определена, потому была пересчитана с использованием формулы (2) из K_p .

Используемые данные

По данным каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» за 2021 год с учетом описанных выше ограничений в обзор вошло (рис. 2): 2085 землетрясений Курило-Охотского региона, 335 – Сахалинского региона, 12 землетрясений Приамурья и Приморья.

В 2021 г. в Сахалинском филиале в сотрудничестве с ИМГиГ ДВО РАН проведено определение тензоров сейсмического момента центра 40 наиболее сильных землетрясений, включая одно коровое землетрясение на Сахалине. Расчет осуществлялся с использованием программного комплекса ISOLA [10, 11]. Механизмы очагов крупнейших событий, показанных на рис. 2, обсуждаются ниже. На территории юга Дальнего Востока России зарегистрировано 82 ощутимых землетрясения с эпицентрами в пределах изучаемых регионов: 1 – в Приамурье, 23 – в Сахалинском, 58 – в Курило-Охотском регионе. Эпицентры ощутимых землетрясений показаны на рис. 3. Наиболее сильные события также обсуждаются ниже.



Основные характеристики сейсмичности

Для расчета энергии землетрясений в предыдущих обзорах использовалась широко применяемая формула Гуттенберга–Рихтера [6]:

$$\text{Lg } E = 4.8 + 1.5 M_s \text{ (Дж)}, \quad (5)$$

где E – сейсмическая энергия землетрясения, а M_s – магнитуда по поверхностным волнам, в изучаемых регионах ей соответствует M_{LH} .

Для сохранения преемственности с предыдущими работами продолжим использовать данную формулу, переходя от M_{wa} к M_{LH} через соотношение (4). Наиболее существенная часть сейсмической энергии выделяется при самых сильных землетрясениях с $M \geq 5.8$. Для расчета энергии этих событий будет использоваться $M_{W(per)}$. Это не вполне корректно, однако оправданно в связи со значительным разбросом в определении энергетических характеристик сильных событий по объемным и поверхностным волнам. M_{W} , хотя и является производной сейсмического момента, даст более точную и устойчивую оценку изменения суммарной сейсмической энергии, поскольку, как показано в работе [12], магнитуда по поверхностной волне M_s (она же M_{LH}) на интервале магнитуд 6.0–8.0 очень близка к M_{W} .

На рис. 4 показана суммарная ежегодная величина сейсмической энергии изучаемых регионов. Видно, что 2021 год не выделяется на фоне предыдущего десятилетия пиковыми значениями.

Как и в предыдущем обзоре [3], для более формализованного количественного сравне-



Рис. 4. Суммарная сейсмическая энергия землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2011–2021 гг.

Fig. 4. Total seismic energy of the earthquakes in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2011–2021.

ния сейсмичности регионов по отношению к предыдущим годам были построены функции распределения годовой сейсмической энергии отдельно для глубоких и коровых землетрясений Приамурья и Приморья, Сахалина и совокупной – для Курило-Охотского региона по методике статистической оценки уровня сейсмичности СОУС’09 В.А. Салтыкова [13] (рис. 5, 6). Основой для функции распределения послужили региональные каталоги Приамурья и Приморья 1975–2021 гг., Сахалинского региона 1962–2021, Курило-Охотского региона 1920–2021 гг. [14–16], дополненные данными Сахалинского филиала СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2021 г. M – магнитуда; H – глубина гипоцентра, км; 1 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН; 2 – границы регионов. Номера эпицентров землетрясений согласно таблице. Приведены механизмы очагов наиболее сильных землетрясений. Пунктирной линией здесь и на рис. 6 показано положение Курильского глубоководного жолоба и Курильской глубоководной котловины.

Fig. 2. 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; 2 – region borders. Numbers of the earthquake epicenters are in accordance with the table. Focal mechanisms of the strongest earthquakes are given. Here and in Fig. 6, the position of the Kuril deep-sea trench and the Kuril deep-sea basin is shown with dotted line.

Рис. 3. Карта эпицентров ощутимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2021 г. M – магнитуда; I – максимальная интенсивность сотрясений, балл; 1 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН; 2 – границы регионов. Номера эпицентров землетрясений согласно таблице.

Fig. 3. Appreciable earthquake epicenters map in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2021. M – magnitude; I – maximum shaking intensity, point; 1 – seismic stations; 2 – region borders. Numbers of the earthquake epicenters are in accordance with the table.

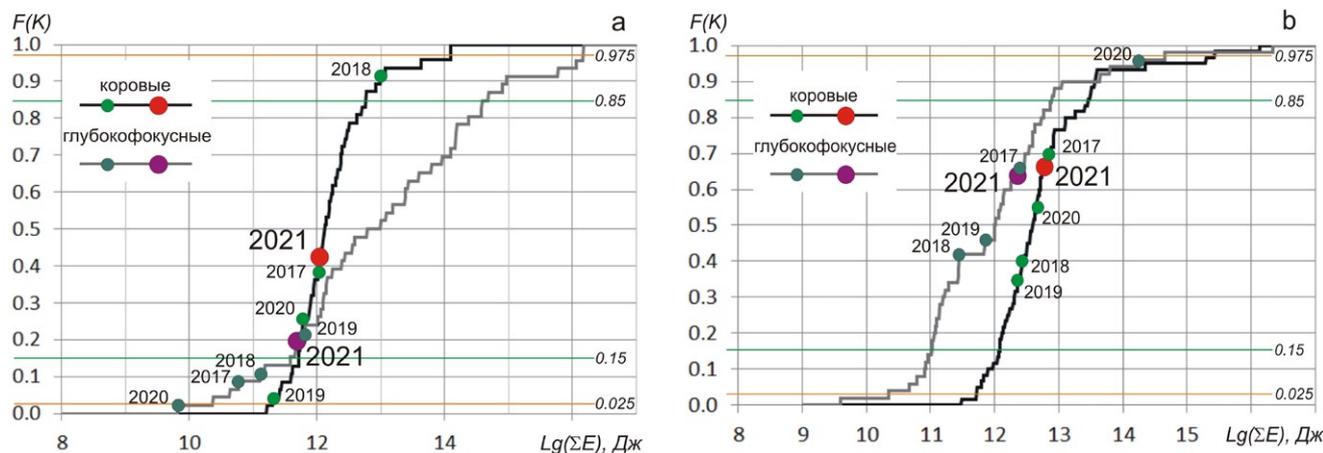


Рис. 5. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии для коровых (черный цвет линии) и мантийных землетрясений региона Приамурье и Приморье (а) и Сахалинского региона (б). Отмечены точки, соответствующие каждому году периода 2017–2021.

Fig. 5. Empirical distribution function of the annual seismic energy for crustal (black line) and mantle earthquakes of the Amur-Primorye region (a) and of the Sakhalin region (b). The points corresponding to each year of the period of 2017–2021 are marked.

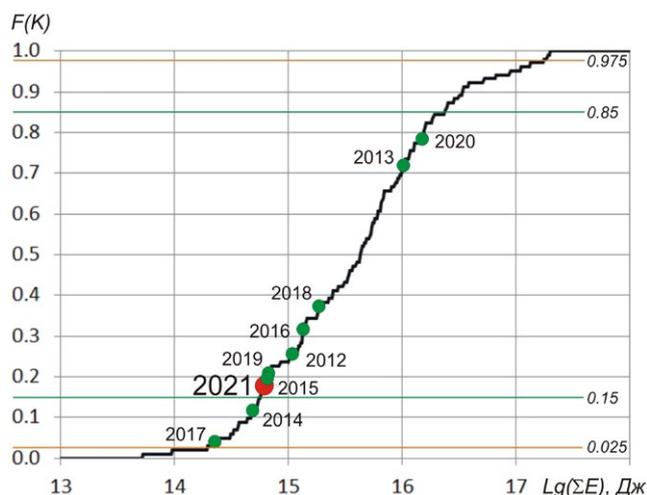


Рис. 6. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии землетрясений Курило-Охотского региона. Отмечены точки, соответствующие каждому году периода 2012–2021.

Fig. 6. Empirical distribution function of the annual seismic energy of earthquakes in the Kuril-Okhotsk region. The points corresponding to each year of the period of 2012–2021 are marked.

В работе (рис. 5, 6) мы придерживаемся предложенной автором [13] методики шкалы уровней сейсмичности:

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

В регионе Приамурье и Приморье (рис. 5 а) уровень коровой и глубокофокусной сейсмичности 2021 г. можно охарактеризовать как фоновый средний, при этом нужно отметить, что на участке Японской и Курило-Камчатской сейсмофокальных зон под территорией Приморья в последние годы регистрируется очень мало землетрясений как в оперативном каталоге, так и в окончательном, а магнитуда событий находится вблизи уровня регистрационных возможностей сети, поэтому оценка сейсмической энергии весьма приблизительная, но, несомненно, значительно ниже средних значений за последние полвека. В Сахалинском регионе (рис. 5 б) уровень коровой и глубокофокусной сейсмичности также фоновый средний. В Курило-Охотском регионе (рис. 6) уровень сейсмичности находится вблизи границы среднего и пониженного фонового.

Удобным способом проследить динамику сейсмичности на временной шкале является график накопления условной упругой деформации по Беньофу [17]. Использование этого параметра $\Sigma E^{1/2}$ позволяет уменьшить влияние пиковых значений сейсмической энергии наиболее сильных землетрясений, а наклон графика позволяет судить о повышении или понижении уровня фоновой сейсмичности в течение года или более длительного временного периода. Поскольку наиболее сильные события

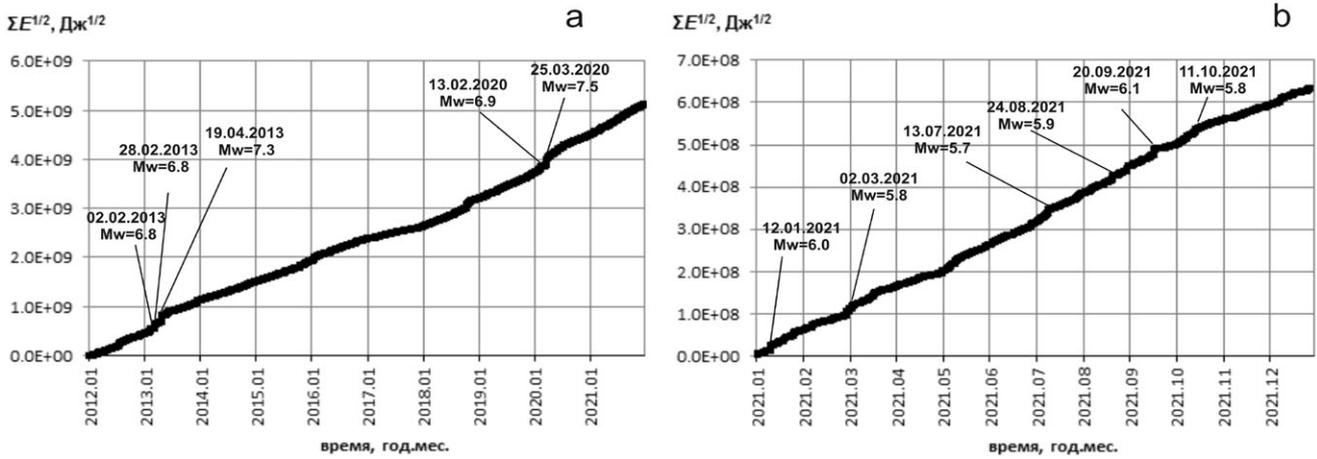


Рис. 7. График Беньофа для Курило-Охотского региона по данным каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2012–2021 гг. (а) и каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» за 2021 г. (б).

Fig. 7. Benioff diagrams for the Kuril-Okhotsk region by the data of the SB FRC UGS RAS catalogs for 2012–2021 (a) and the “Yuzhno-Sakhalinsk” RPC catalog for 2021 (b).

обычно происходят в Курило-Охотском регионе, график Беньофа построен только для этой территории. Как видно из рис. 7, в 2021 г. значительных землетрясений в регионе не отмечено. Едва заметные ступени на рис. 7 б, соответствующие наиболее сильным событиям с магнитудами до $M_w = 6.1$, полностью теряются на графике за десятилетний период (рис. 7 а), а уровень наклона остается примерно постоянным в течение года, сопоставимым с наклоном графика предыдущих спокойных лет.

Условную упругую деформацию по Беньофу можно также использовать для пространственного представления сейсмичности территории. Величина плотности условной упругой деформации рассчитывалась по формуле:

$$\bar{\epsilon} = 1000 \cdot \Sigma E^{1/2} / S, \tag{6}$$

где E – энергия землетрясения, вычисленная по формуле (5), Дж, S – площадь поверхности, содержащей эпицентр землетрясения, км^2 . 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 км^2 . Для сильных ($M \geq 7.5$) землетрясений ее величина перераспределялась на примерную площадь их очаговых зон. При построении изолинии дополнительно сглаживались средствами ПО Surfer. На рис. 8 а показана карта распределения величины $\bar{\epsilon}$ в 2021 г., на рис. 8 б – за предшествующий десятилетний период 2011–2020 г.

Картина распределения параметра $\bar{\epsilon}$ за десятилетний период хорошо соответствует общим представлениям о сейсмичности Курило-Охотского и Сахалинского регионов. Основная полоса максимальных значений плотности условной упругой деформации между Курильской островной дугой и глубоководным желобом соответствует зоне контакта литосферных плит. Параллельно ей под Охотским морем и Хоккайдо намечаются просветы, соответствующие области сейсмического затишья на глубине погружения плиты 200–300 км в юго-западной части, 200–400 км в северо-восточной части зоны субдукции. Далее идет параллельный островной дуге пояс сейсмичности, отождествляемый с фазовыми переходами в субдуцирующей плите на глубинах 350–450 км. Следующий пояс сверхглубокофокусной сейсмичности на глубинах около 600 км на рис. 8 б в основном намечен очагами сильнейших землетрясений 2012 г. ($M_w = 7.7$) [18] и 2013 г. ($M_w = 8.3$) [19], значение параметра $\bar{\epsilon}$ в которых максимально и распределено на область, примерно соответствующую положению очаговых зон этих событий. Более слабые землетрясения на этих глубинах, особенно с эпицентрами в Охотском море, могут пропускаться в связи с низкой регистрационной возможностью сейсмологической сети, потому «пояс» сейсмичности на десятилетнем интервале здесь не образовался. Что касается латерального распределения параметра Беньофа

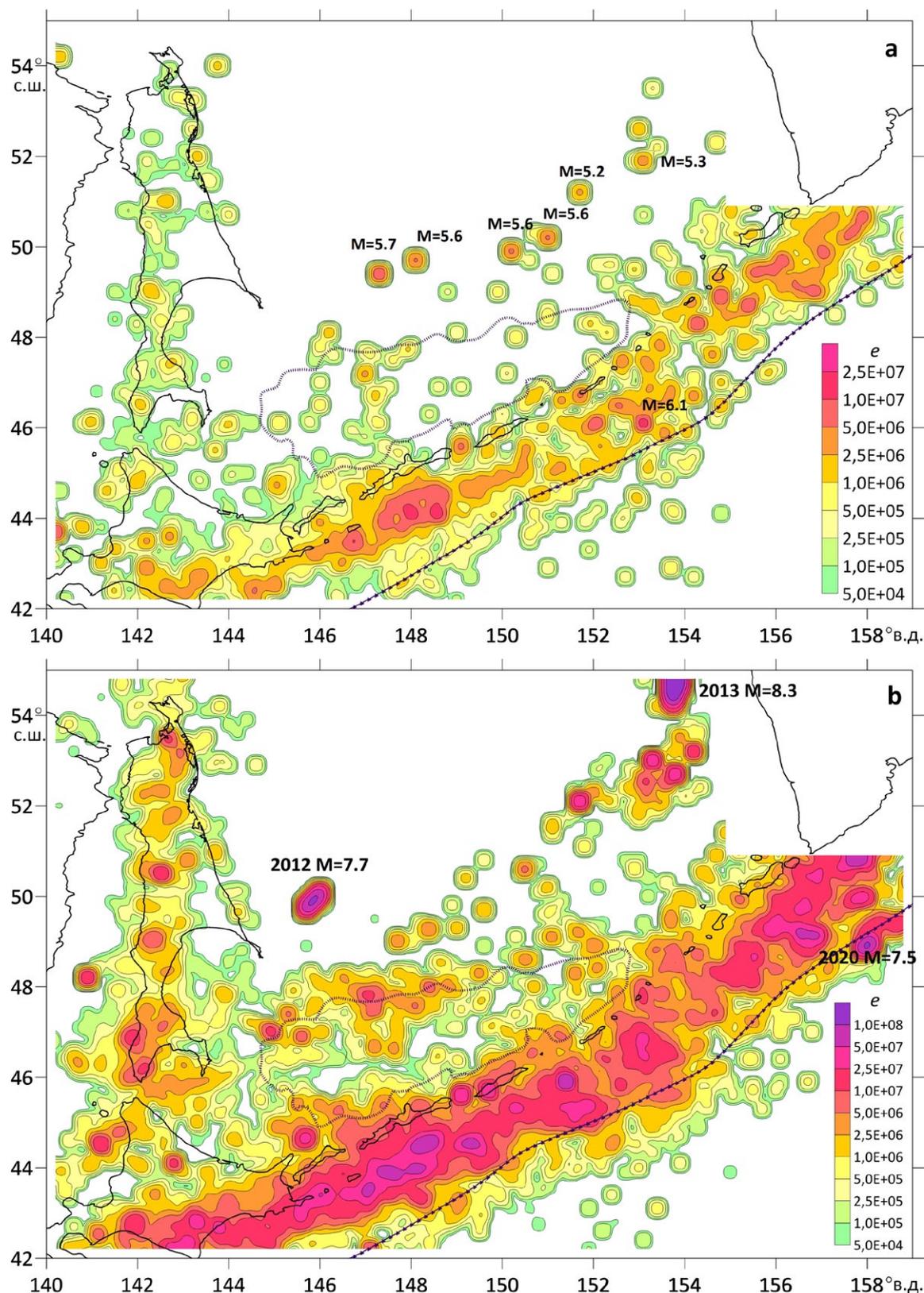


Рис. 8. Плотность условной упругой деформации Сахалинского и Курило-Охотского регионов по данным каталогов РИОЦ «Южно-Сахалинск» 2021 г. (а) и СФ ФИЦ ЕГС РАН 2011–2020 гг. (б). Пунктиром показано положение Курильского глубоководного желоба и Курильской глубоководной котловины.

Fig. 8. Density of conditional elastic deformation of the Sakhalin and Kuril-Okhotsk regions by the data of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC catalog in 2021 (a) and the earthquake catalogs of the SB FRC UGS RAS in 2011–2020 (b). The position of the Kuril deep-sea trench and the Kuril deep-sea basin is shown with dotted line.

вдоль островной дуги, наиболее активны ее фланги, включающие самое сильное коровое событие последнего десятилетия в 2020 г. с $M_w = 7.5$ в районе желоба напротив о. Парамушир. Центральная часть дуги менее сейсмически активна, особенно область, прилегающая к островам Матуа и Шиашкотан, о чем упоминалось на основании карт сейсмической активности A_{10} ранее [2]. В Сахалинском регионе максимумы параметра \bar{e} вытянуты вдоль острова, смещаясь с юго-западного побережья к северо-восточному, что соответствует представлениям о положении границы Охотской и Амурской литосферных плит.

В 2021 г. пиковых значений параметра \bar{e} , сопоставимых с максимумами предыдущего десятилетнего периода (рис. 8), не отмечается. В основном полоса активной сейсмогенерации по-прежнему соответствует положению зоны контакта Тихоокеанской и Охотской литосферных плит. Более активны фланги островной дуги, центр несколько менее активен, однако в 2021 г. отмечен сильным землетрясением 20 сентября $M_w = 6.1$ (см. ниже), параметр $\bar{e} = 1.37 \cdot 10^7$ Дж^{1/2}/км² которого находится ниже максимумов за десятилетний период для этого региона, что является признаком фонового характера произошедшего землетрясения. Области изгиба субдуцирующей плиты под глубоководным желобом и островной дугой в 2021 г. не отмечены значительными очагами сейсмогенерации. Интересен ряд сильных глубокофокусных событий ($H = 415\text{--}605$ км, $M_w = 5.2\text{--}5.7$) с эпицентрами в Охотском море, существенно дополняющих пояса сверхглубокофокусной сейсмичности и частично заполняющих пустое пространство между очагами сильнейших землетрясений 2012 и 2013 годов (рис. 8 а). На Сахалине в 2021 г. поле сейсмогенерации меридионального простирания обособилось в две линии, соответствующие положению Тымь-Поронайского (центральная часть острова) и Хоккайдо-Сахалинского (северо-восточное побережье) разломов.

В таблице приводятся данные из каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» о параметрах наиболее значимых сейсмических событий 2021 г. по магнитуде и произведенному макросейсмическому эффекту.

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

Сейсмическая активность региона *Приамурье и Приморье* сравнительно невысокая. Параметры большей части землетрясений здесь определяются при окончательной обработке. Как было отмечено [3], в оперативном каталоге СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2020 г. содержится 11 землетрясений с эпицентрами на территории региона, в окончательный каталог 2020 г. вошло 93 землетрясения. В 2021 г. в этом регионе по данным РИОЦ произошло 12 землетрясений.

Наиболее сильное землетрясение с эпицентром в земной коре на территории региона отмечено 14 января в 07:19 UTC ($M_{wa} = 4.1$, $H = 9$ км; № 1 в таблице и на рис. 2) в Сквородинском районе Амурской области южнее очаговой зоны сильного Сквородинского события 2011 г. [20].

Единственное в 2021 г. ощутимое землетрясение на территории Приамурья и Приморья было зарегистрировано 18 января в 12:20 UTC ($M_{wa} = 3.0$, $H = 5$ км; № 2 в таблице и на рис. 2, 3). Эпицентр землетрясения расположен недалеко от г. Облучье Еврейской АО, где отмечались гул и сотрясения оконных стекол, интенсивность сотрясений оценивается в 3 балла.

Из двух глубокофокусных землетрясений в этом регионе наиболее сильное произошло 20 декабря в 09:50 UTC ($M_{wa} = 4.2$, $H = 474$ км, № 3 в таблице и на рис. 2).

По *Сахалинскому региону* в каталоге за 2021 г. содержатся параметры 335 землетрясений, включая 17 мантийных на продолжении Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны (рис. 2). По 23 землетрясениям зарегистрированы данные об ощутимости жителями Сахалинской области.

Самое сильное ощутимое событие произошло 18 апреля в 18:16 UTC ($M_{wa} = 4.4$, $M_w = 4.2$, $H = 6$ км; № 4 в таблице и на рис. 2, 3) вблизи пос. Тымовское, где вызвало сотрясения интенсивностью в 5-6 баллов. В течение 5 дней в очаговой зоне землетрясения было зарегистрировано несколько десятков афтершоков,

пять из которых также вызвали ощутимые сотрясения. Параметры большинства афтершоков фиксировались только одной сейсмостанцией «Тымовское», потому что точность их определения низка, тем не менее, из-за близкого расположения очаговой зоны землетрясения к сейсмостанции, это событие может представлять интерес для изучения афтершоковых последовательностей слабых землетрясений

о. Сахалин. Механизм очага землетрясения (рис. 2) классифицируется как взбросо-сдвиг, событие произошло в условиях субширотного субгоризонтального сжатия, одна из нодальных плоскостей юго-юго-западного простирания субвертикальна, вторая, северо-западного простирания, падает на северо-восток. Землетрясение относится к зоне Тымь-Поронайского (Центрально-Сахалинского) взбросо-надвига.

Таблица. Параметры наиболее значимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН 2021 г. (по оперативным данным РИОЦ «Южно-Сахалинск»)

Table. Parameters of the most significant earthquakes in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2021 (according to the operational data of “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC)

№ п/п	Дата / Date	Время / Time	φ	λ	h, км	M _{wd} M _w	Интенсивность сотрясений / Intensity (населенный пункт, балл / settlement, point)
	day. mth. year	t ₀ h:min:sec					
Приамурье и Приморье / Amur-Primorye region							
1	14.01.2021	07:19:00	53.8	123.17	9	4.1 –	Не ощущалось
2	18.01.2021	12:20:29	49.2	130.95	5	3.0 –	г. Облучье, Еврейская АО, 3
3	20.12.2021	09:50:21	43.51	132.67	474	4.2 –	Не ощущалось
Сахалинский регион / Sakhalin region							
4	18.04.2021	08:16:49	50.85	142.55	6	4.4 4.2	пос. Тымовское, 5-6; Восход, Воскресеновка, Белое, 5; Красная Тымь, 4-5; Подгорное, Кировское, 4; Молодежное, 3-4; Ясное, Зональное, Адо-Тымово, 3; г. Александровск-Сахалинский, 2 (Сахалинская обл.)
5	03.06.2021	01:43:50	45.35	143.69	293	4.4 –	Не ощущалось
6	09.06.2021	16:20:35	54.09	140.23	5	4.5 –	Не ощущалось
Курило-Охотский регион / Kuril-Okhotsk region							
7	12.01.2021	02:39:42	43.56	140.11	216	5.9 6.0	Не ощущалось
8	20.02.2021	13:23:27	43.38	146.75	64	5.1 5.0	пос. Малокурильское, 4-5; Южно-Курильск, Лагунное, 3; Горячий Пляж, 2-3; Головнино, 2 (Сахалинская обл.); Хоккайдо, 2-3 б. по шкале JMA*
9	02.03.2021	21:22:44	43.93	147.91	46	5.9 5.8	пос. Малокурильское, 5; Южно-Курильск, Лагунное, Горячий Пляж, Головнино, 4 (Сахалинская обл.); Хоккайдо, 2-3 б. по шкале JMA**
10	24.08.2021	05:37:51	48.54	155.34	47	5.7 5.9	г. Северо-Курильск, 2 (Сахалинская обл.)
11	20.09.2021	20:25:23	45.92	153.03	41	5.9 6.1	г. Курильск, пос. Рейдово, 2-3; Южно-Курильск, Малокурильское, Горячие Ключи, 2 (Сахалинская обл.)

* <https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2021/02/20/2021-02-20-22-23-43.html>

** <https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2021/03/03/2021-03-03-06-23-13.html>

Самое сильное глубокофокусное землетрясение в Сахалинском регионе произошло 3 июня в 01:43 UTC ($M_{wa} = 4.4$, $H = 293$ км; № 5 в таблице и на рис. 2). Эпицентр находится в Охотском море южнее Тонино-Анивского полуострова.

Еще одно умеренно сильное землетрясение, формально относимое к Сахалинскому региону, произошло 9 июня в 16:20 UTC ($M_{wa} = 4.5$, $H = 5$ км; № 6 в таблице и на рис. 2) в Хабаровском крае севернее Николаевска-на-Амуре. Как видно из рис. 2, в этом районе в 2021 г. произошло несколько сопоставимых по магнитуде землетрясений, данных об их ощутимости не зарегистрировано.

К территории *Курило-Охотского региона* в 2021 г. отнесено 2085 землетрясений, ощутимые колебания на территории Сахалинской области вызвали 58 из них.

Крупнейшее по магнитуде землетрясение произошло 20 сентября в 20:25 UTC ($M_w = 6.1$, $M_{wa} = 5.9$, $H = 41$ км; № 11 в таблице и на рис. 2, 3) в центральной части Курильской островной дуги. Сила сотрясений на Южных Курилах достигла 3 баллов. Механизм очага сдвиговый, одна из нодальных плоскостей с правосторонней сдвиговой компонентой простирается в юго-западном направлении вдоль островной дуги, вторая, с левосторонней компонентой сдвига, ориентирована на северо-запад. Гипоцентр расположен в очаговой зоне Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. с $M_w = 8.3$ [21].

Максимальная в 2021 г. интенсивность сотрясений от землетрясений региона была отмечена в результате события 2 марта в 21:22 UTC ($M_w = 5.8$, $M_{wa} = 5.9$, $H = 46$ км; № 9 в таблице и на рис. 2, 3). Эпицентр расположен восточнее о. Шикотан. Интенсивность в 5 баллов была зарегистрирована в пос. Малокурильское, в других населенных пунктах Южных Курил сила сотрясений достигала 4 баллов. Землетрясение произошло в зоне контакта Тихоокеанской и Охотской литосферных плит, механизм очага – пологий надвиг с нодальными плоскостями, ориентированными вдоль островной дуги.

Похожее по сейсмодислокации в очаге и макросейсмическому эффекту событие произошло 20 февраля в 12:23 UTC ($M_w = 5.0$,

$M_{wa} = 5.1$, $H = 64$ км; № 8 в таблице и на рис. 2, 3). Эпицентр южнее о. Шикотан, интенсивность колебаний в пос. Малокурильское составила 4-5 баллов, в других населенных пунктах – до 3 баллов. Механизм очага – также пологий надвиг.

В северной части Курильской гряды наиболее сильное землетрясение произошло 24 августа в 05:37 UTC ($M_w = 5.9$, $M_{wa} = 5.7$, $H = 47$ км; № 10 в таблице и на рис. 2, 3). Гипоцентр также расположен в зоне контакта плит, механизм очага – пологий надвиг с небольшой сдвиговой компонентой, вероятные плоскости разрыва ориентированы вдоль островной дуги. Событие вызвало слабые колебания в г. Северо-Курильск.

Восточнее о. Хоккайдо 12 января в 02:39 UTC ($M_w = 5.0$, $M_{wa} = 5.9$, $H = 216$ км; № 7 в таблице и на рис. 2) произошло самое сильное событие 2021 г. в зоне промежуточных глубин землетрясений. На территории Сахалинской области и Приморья оно не ощущалось. Механизм очага относительно поверхности классифицируется как сброс, обе нодальные плоскости ориентированы субширотно.

Заключение

С 2021 г. в СФ ФИЦ ЕГС РАН оперативный каталог землетрясений юга Дальнего Востока РФ формируется на основе определений РИОЦ «Южно-Сахалинск». Самой массовой энергетической характеристикой каталога РИОЦ является магнитуда M_{wa} , которая при соблюдении ряда условий применения является довольно устойчивой. Получены межмагнитудные регрессионные соотношения, позволяющие связать ее с некоторыми другими энергетическими характеристиками землетрясений регионов. В обзоре сейсмичности 2021 г. M_{wa} взята за основу для каталога землетрясений с магнитудами до $M = 5.8$. Для более сильных событий основной энергетической характеристикой остается моментная магнитуда $M_{w(per)}$.

На основе оперативного каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» получены основные характеристики сейсмичности регионов Дальнего Востока РФ в 2021 г.: оценки уровня сейсмичности СОУС'09; графики Беньофа; карты плотности условной упругой деформации. Для сравнения приведены карты и графики за

предыдущий десятилетний период по данным окончательных каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН.

В 2021 году на территории Приамурья и Приморья, Сахалинского и Курило-Охотского регионов не отмечено увеличения сейсмической активности. Уровень коровой и глубокофокусной сейсмичности характеризуется как фоновый средний.

Наиболее сильные землетрясения относятся к Курило-Камчатской сейсмофокальной области, в основном – к зоне контакта Тихоокеанской и Охотоморской литосферных плит. Более активны фланги островной дуги, однако центр отмечен сильным землетрясением 20 сентября $M_w = 6.1$. Зарегистрирован ряд относительно сильных глубокофокусных событий ($H = 415\text{--}605$ км, $M_w = 5.2\text{--}5.7$) с эпицентрами в Охотском море между очагами сильнейших землетрясений 2012 ($M_w = 7.7$, $H = 589$ км) и 2013 г. ($M_w = 8.3$, $H = 630$ км).

На Сахалине в 2021 г. поле сейсмогенерации меридионального простирания обособилось в две линии, соответствующие положению Тымь-Поронайского (центральная часть острова) и Хоккайдо-Сахалинского (северо-восточное побережье) разломов. Самое сильное ощутимое землетрясение $M_{wa} = 4.4$ произошло 18 апреля вблизи пос. Тымовское, где оно вызвало сотрясения интенсивностью в 5-6 баллов.

Список литературы

- Сафонов Д.А., Фокина Т.А., Коваленко Н.С. 2019. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2018 году. *Геосистемы переходных зон*, 3(4): 364–376. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.364-376>
- Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Фокина Т.А., Коваленко Н.С. 2020. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2019 году. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 146–159. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.146-159>
- Сафонов Д.А., Фокина Т.А. 2021. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2020 году. *Геосистемы переходных зон*, 5(4): 308–319. <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.4.308-319>
- Фокина Т.А., Коваленко Н.С., Костылев Д.В., Левин Ю.Н., Лихачева О.Н., Михайлов В.И. 2018. Приамурье и Приморье, Сахалин и Курило-Охотский регион. В ежегоднике: *Землетрясения России в 2016 году*. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 45–53.
- Richter C.F. 1935. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. of the Seismological Society of America*, 25: 1–32.
- Richter C.F. 1958. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.
- Kostylev D.V., Boginskaya N.V., Zakupin A.S. 2022. Seismic activity in the focus of the Uglegorsk earthquakes, Sakhalin Island, related to intensive development of coal deposits. *Pure Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02933-6>
- 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>
- Droznin D.V., Droznina S.Ya. 2011. Interactive DIMAS Program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, 47(3): 215–224. <https://doi.org/10.3103/S0747923911030054>
- Sokos E., Zahradnik 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.
- 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.
- Benioff H. 1951. Earthquakes and rock creep. *Bull. of the Seismological Society of America*, 41(1): 31–62. <https://doi.org/10.1785/bssa0410010031>
- Семенова Е.П., Сафонов Д.А., Фокина Т.А. 2018. Глубокофокусное землетрясение 14 августа 2012 г. с $M_w = 7.7$, $I_0 = 4$ (Охотское море). В ежегоднике: *Землетрясения Северной Евразии*, 21 (2012 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, с. 377–386.
- Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А., Кравченко Н.М., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Раевская А.А., Салтыков В.А., Чебров Д.В., Ландер А.В. 2013. Глубокое Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. с магнитудой $M_w = 8.3$ – сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(21): 17–24.
- Khanchuk A.I., Safonov D.A., Radziminovich Ya.B., Kovalenko N.S., Kononov A.V., Shestakov N.V., Bykov V.G., Serov M.A., Sorokin A.A. 2012. The largest recent earthquake in the Upper Amur Region on October 14, 2011: First results of multidisciplinary study. *Doklady Earth Sciences*, 445(1): 916–919.
- Чеброва А.Ю., Чебров В.Н., Гусев А.А., Ландер А.В., Гусева Е.М., Митюшкина С.В., Раевская А.А. 2015. Воздействие Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г. ($M_w = 8.3$) на территории Камчатки и мира. *Вулканология и сейсмология*, 4: 3–22. <https://doi.org/10.7868/S02030306150400333>

References

- Safonov D.A., Fokina T.A., Kovalenko N.S. 2019. Seismicity of the South Far East of Russia in 2018. *Geosistemy*

- perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 364–376. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.364-376>
2. Safonov D.A., Kostylev D.V., Fokina T.A., Kovalenko N.S. **2020**. Seismicity of the South Far East of Russia in 2019. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 146–159. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/grtz.2020.4.2.146-159>
 3. Safonov D.A., Fokina T.A. **2021**. Seismicity of the South Far East of Russia in 2020. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 5(4): 308–319. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/grtz.2021.5.4.308-319>
 4. Fokina T.A., Kovalenko N.S., Kostylev D.V., Levin Yu.N., Likhacheva O.N., Mikhailov V.I. **2018**. Priamurye and Primorye, Sakhalin and Kuril-Okhotsk region. In: *Zemletryaseniya Rossii v 2016 gody [Earthquakes in Russia, 2016]*. Obninsk: FRC UGS RAS, 45–53. (In Russ.).
 5. Richter C.F. **1935**. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. of the Seismological Society of America*, 25: 1–32.
 6. Richter C.F. **1958**. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.
 7. Kostylev D.V., Boginskaya N.V., Zakupin A.S. **2022**. Seismic activity in the focus of the Ulegorsk earthquakes, Sakhalin Island, related to intensive development of coal deposits. *Pure Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02933-6>
 8. Kostylev D.V. **2021**. Formation of a unified system for collecting seismological information in the Sakhalin Branch of 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>
 9. Droznin D.V., Droznina S.Ya. **2011**. Interactive DIMAS Program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, 47(3): 215–224. <https://doi.org/10.3103/S0747923911030054>
 10. Sokos E., Zahradnik 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>
 11. 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.).
 12. 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.).
 13. Saltykov V.A. **2011**. A statistical estimate of seismicity level: The method and results of application to Kamchatka. *J. of Volcanology and Seismology*, 5: 123–128. <https://doi.org/10.1134/S0742046311020060>
 14. Poplavskaya L.N. (ed.) **2006**. [Regional catalog of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 103 p. (In Russ.).
 15. Kim Ch.U., Andreeva M.Yu. **2009**. [Earthquake catalog of the Kuril-Kamchatka region (1737–2005)]. Preprint. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 126 p.
 16. Safonov D.A., Nagornyyh 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.).
 17. Benioff H. **1951**. Earthquakes and rock creep. *Bull. of the Seismological Society of America*, 41(1): 31–62. <https://doi.org/10.1785/bssa0410010031>
 18. Semenova E.P., Safonov D.A., Fokina T.A. **2018**. [Deep-focus earthquake of August 14, 2012, Mw = 7.7, Io = 4 (the Sea of Okhotsk)]. In: *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii = Earthquakes in Northern Eurasia*, 21 (2012): 377–386. Obninsk: FITS EGS RAN [FRC UGS RAS]. (In Russ.).
 19. Chebrov V.N., Kugaenko Yu.A., Vikulina S.A., Kravchenko N.M., Matveenko E.A., Mitiushkina S.V., Raevskaya A.A., Saltykov V.A., Chebrov D.V., Lander A.V. **2013**. [Deep earthquake in the Sea of Okhotsk 24.05.2013 with a magnitude Mw = 8.3 – the strongest seismic event near Kamchatka coastline for the period of detailed seismological observations]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(21): 17–24. (In Russ.).
 20. Khanchuk A.I., Safonov D.A., Radziminovich Ya.B., Kovalenko N.S., Konovalov A.V., Shestakov N.V., Bykov V.G., Serov M.A., Sorokin A.A. **2012**. The largest recent earthquake in the Upper Amur Region on October 14, 2011: First results of multidisciplinary study. *Doklady Earth Sciences*, 445(1): 916–919.
 21. Chebrova A.Y., Chebrov V.N., Gusev A.A., Lander A.V., Guseva E.M., Mityushkina S.V., Raevskaya A.A. **2015**. The impacts of the MW 8.3 Sea of Okhotsk earthquake of May 24, 2013 in Kamchatka and worldwide. *J. Volcanology and Seismology*, 9(4): 223–241. <https://doi.org/10.1134/S074204631504003X>

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

Семёнова 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

Поступила в редакцию 30.03.2022
После рецензирования 20.04.2022
Принята к публикации 25.04.2022

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 Seismic station «Yuzhno-Sakhalinsk», Sakhalin Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, semenova@seismo.sakhalin.ru

Received 30 March 2022
Revised 20 April 2022
Accepted 25 April 2022