

УДК 550.348. (571.642)

СЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИАМУРЬЯ и ПРИМОРЬЯ, САХАЛИНА и КУРИЛО-ОХОТСКОГО РЕГИОНА в 2021 году

Д.А. Сафонов¹, Е.П. Семенова², Д.В. Костылев^{1,2}

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия, d.safonov@imgg.ru

²Сахалинский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия, semenova@seismo.sakhalin.ru

Аннотация. Представлен обзор сейсмичности Приамурья и Приморья, Сахалинского и Курило-Охотского регионов по данным каталогов Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН, полученных с использованием сейсмических станций региональной сети филиала, с привлечением данных сейсмологических российских и зарубежных агентств. Определены параметры 1703 сейсмических событий. Для 45 землетрясений рассчитаны механизмы очага. От 67 землетрясений с эпицентрами на территории вышеуказанных регионов отмечен макросейсмический эффект. Приведены карты эпицентров, проанализировано число коровых и глубокофокусных землетрясений, их магнитуда и суммарная сейсмическая энергия в сравнении со средними параметрами в предыдущие годы. Дано краткое описание сильнейших сейсмических событий. В 2021 г. сейсмичность в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН оставалась умеренной, все упомянутые в статье события можно отнести к фоновым.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмичность, магнитуда, сейсмическая энергия.

Для цитирования: Сафонов Д.А., Семенова Е.П., Костылев Д.В. Сейсмичность Приамурья и Приморья, Сахалина и Курило-Охотского региона в 2021 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – С. 150–161. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.13> EDN: NFCBPH

Введение. Статья продолжает ежегодный обзор и анализ сейсмичности территории трех регионов: Приамурья и Приморья, Сахалинского и Курило-Охотского [1]. Регистрация сейсмических событий на территории этих регионов осуществляется Сахалинским филиалом ФИЦ ЕГС РАН. Основой статьи являются каталоги землетрясений [Приложения PR2, SH3, KL2], которые составлены по результатам обработки данных, полученных сетью сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН [Приложения PR1, SH1, SH2, KL1] в 2021 г. Для отдельных землетрясений рассчитаны механизмы очагов [Приложения SH4, KL4]. Для ощутимых землетрясений собраны сведения об интенсивности макросейсмических проявлений на территории региона [Приложения PR3, SH6, KL6].

Региональная сеть станций. Мониторинг сейсмической активности в зоне ответственности Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН (международный код сети – SAGSR) в 2021 г. проводился с использованием данных, поступающих от 37 стационарных сейсмических станций и 10 пунктов полевых инструментальных сейсмологических наблюдений, расположенных на о. Сахалин [Приложения SH1, SH2], Курильских островах [Приложение KL1], в Приамурье и Приморье [Приложение PR1] (рис. 1). К определению параметров землетрясений привлекались данные сейсмологических российских и зарубежных агентств [2–5].

В 2021 г., в связи с отсутствием стабильных каналов передачи данных в Амурской области, три станции «Зейского узла» («Бомнак», «Кировский» и «Октябрьский») были переведены в режим работы без передачи данных в реальном времени. Данные этих станций сохраняются на встроенном накопителе регистратора и передаются в информационно-обрабатывающий центр «Зея» ежемесячно для последующей обработки. Указанные станции с 2021 г. оборудованы российскими сейсмографами ZETLAB ZET 7152-N VER.3 со встроенными короткопериодным велосиметром и акселерометром.

В апреле 2021 г., в рамках выполнения решения протокола Сахалинского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска от 6 октября 2020 г., были развернуты два новых автономных пункта сейсмического мониторинга в районе активной добычи угля на Солнцевском угольном разрезе (Углегорский р-н Сахалинской обл.). Обеспечена интеграция данных, поступающих с пунктов в режиме реального времени в единую систему сейсмического мониторинга региона. Созданная система позволяет вести представительную регистрацию сейсмических событий с $M_L \geq 0.8$ в непосредственной близости к угольному разрезу, что дает возможность с повышенной точностью контролировать проводимые взрывные работы, а также слабую и возможную наведенную сейсмичность, сформировавшуюся вследствие постоянного техногенного воздействия на недра [6].

Регистрационные возможности сети сейсмологических наблюдений в целом по состоянию на 31 декабря 2021 г. соответствуют предыдущим оценкам, рассмотренным в статье [7]: текущая конфигурация сети сейсмических станций (рис. 1), с учётом установленного оборудования и привлечения в оперативном режиме данных станций соседних регионов, позволяет обеспечить на большей части зоны ответственности [8] возможность регистрации как минимум тремя сейсмостанциями (что необходимо для корректного определения эпицентра) землетрясений, начиная с представительной магнитуды $M_{\min}=3.0$ [9]. Исключение составляют центральная часть Охотского и северная часть Японского морей, район Средних Курильских островов и приграничная часть Приамурья, где представительной можно считать магнитуду событий $M_{\min}=3.5-4.0$. Благодаря более плотной сети пунктов наблюдений, а также доступу к короткопериодным станциям Хоккайдского университета, на части Южных Курил и территории Сахалинского региона порог уверенной регистрации составляет $M_{\min}=2.5$.

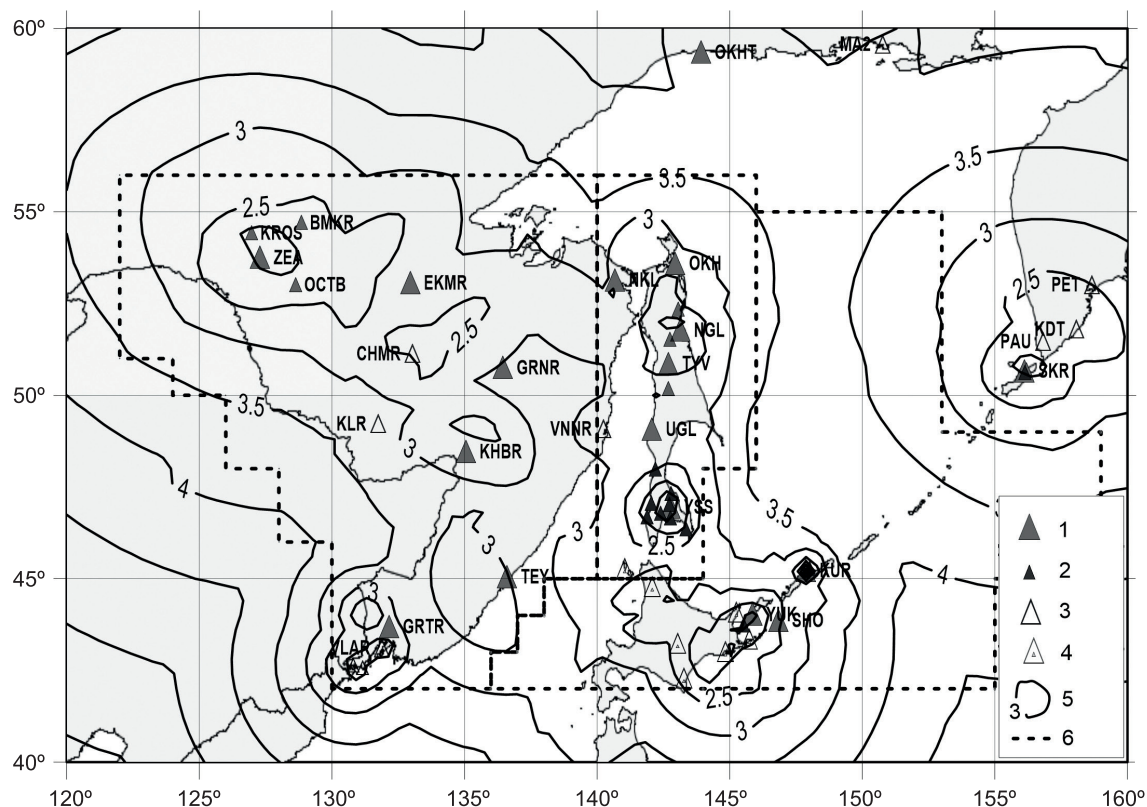


Рис. 1. Карта магнитудной представительности землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2021 г.

1 – сейсмическая станция СФ ФИЦ ЕГС РАН, оснащенная широкополосным велосиметром; 2 – прочие пункты регистрации СФ ФИЦ ЕГС РАН; 3 – сейсмическая станция ЦО ФИЦ ЕГС РАН, КФ ФИЦ ЕГС РАН и ИТиГ ДВО РАН; 4 – сейсмическая станция Хоккайдского университета (г. Саппоро); 5 – изолиния M_{\min} ; 6 – границы регионов «Приамурье и Приморье» (слева), «Сахалин» (в центре) и «Курило-Охотский» (справа).

Методика обработки сейсмологических данных не изменилась по сравнению с предыдущим периодом. Границы регионов также остались прежними [9].

Классификация коровых землетрясений Приамурья и Приморья проводилась по энергетическому классу K_p Т. Г. Раутиан [10] с пересчетом в магнитуду по формуле:

$$M^p = (K_p - 4) / 1.8. \quad (1)$$

В случае отсутствия определения K_p , $M^p = M_L$.

Энергия коровых землетрясений Приамурья и Приморья оценивалась по формуле Т. Г. Раутиан [11]:

$$E = 10^{K_p} \text{ (Дж)}. \quad (2)$$

Классификация землетрясений, регистрируемых локальной сетью Южного Сахалина [Приложение SH2], также осуществлялась по энергетическому классу K_p шкалы Т. Г. Раутиан [10] с помощью номограммы [12], с переходом к расчетной магнитуде M^p .

Для остальных землетрясений Сахалинского и Курило-Охотского регионов определялся по возможности энергетический класс K_c С. Л. Соловьёва [13]. Для землетрясений Сахалина, Курил и глубокофокусных землетрясений Приамурья и Приморья определялись по возможности магнитуды MLH , MPV , MSH по имеющимся велоси- и акселерограммам в эмуляции записи среднепериодного сейсмометра СКД [14] и $MPVA$, $MSHA$ – по эмуляции записи короткопериодного сейсмометра СКМ-3 [14, 15]. Для отдельных землетрясений в качестве энергетической характеристики использована магнитуда Ч. Ф. Рихтера M_L [16], эта магнитуда определяется на основе эмулированных цифровых записей, приведенных к характеристикам сейсмографа Wood-Anderson, вопросы ее применимости в условиях Дальнего Востока РФ рассмотрены в статье [17].

Для наиболее сильных землетрясений зоны ответственности филиала методом инверсии волновых форм [18, 19] рассчитан тензор сейсмического момента центроида, сейсмический момент и моментная магнитуда $M_{w_{per}}$ [Приложения SH4, KL4].

Переход к расчетной магнитуде M^P осуществлялся с применением формул ниже из [20, 21] в порядке приоритета сверху вниз.

Для событий с глубиной $h \leq 80$ км:

$$M^P = M_{w_{per}};$$

$$M^P = MLH = MS;$$

$$M^P = (K_c - 1.2)/2;$$

$$M^P = (K_p - 4)/1.8;$$

$$M^P = M_L;$$

$$M^P = (MPVA - 2.5)/0.65$$

Для событий с глубиной $h > 80$ км:

$$M^P = M_{w_{per}};$$

$$M^P = (MSH - 1.71)/0.75;$$

$$M^P = (MPV - 2.5)/0.65;$$

$$M^P = (K_c - 1.2)/2;$$

$$M^P = M_L;$$

$$M^P = (MSHA - 1.71)/0.75;$$

$$M^P = (MPVA - 2.5)/0.65$$

Для землетрясений Сахалинского, Курило-Охотского регионов и глубокофокусных землетрясений Приамурья и Приморья расчет сейсмической энергии осуществлялся по формуле Гутенберга-Рихтера [22]:

$$\lg(E, Дж) = 4.8 + 1.5 \cdot M^P \quad (3)$$

Сейсмичность зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН. В каталоги землетрясений зоны ответственности Сахалинского филиала за 2021 г. внесены параметры 1703 событий [Приложения PR2, SH3, KL2], общая карта эпицентров приведена на рис. 2.

Каталог землетрясений **региона Приамурье и Приморье** за 2021 г. [Приложение PR2] содержит основные параметры 120 сейсмических событий, из которых 108 – землетрясения с очагами в земной коре, восемь – глубокофокусные землетрясения, четыре отмечены в каталоге как «возможно взрыв» и при анализе сейсмичности не учитывались. Макросейсмическая информация в этом году получена по одному событию [Приложение PR3]. Глубина коровых землетрясений лежит в диапазоне $h = 5\text{--}25$ км, глубокофокусных – $h = 316\text{--}587$ км. Расчетная магнитуда землетрясений каталога находится в диапазоне $M^P = 1.0\text{--}4.3$.

Наиболее сильное землетрясение с эпицентром в земной коре на территории региона в 2021 г. (4 на рис. 2) произошло 9 июня в 16^h20^m UTC ($M^P = 4.0$, $MPSP = 4.2$, $h = 10$ км). Эпицентр землетрясения расположен севернее г. Николаевска-на-Амуре на границе с Сахалинским регионом. Данные об ощутимости этого землетрясения не поступали.

Единственное ощутимое землетрясение на территории Приамурья и Приморья в 2021 г. (2 на рис. 2) было зарегистрировано 18 января в 12^h20^m UTC ($M^P = 2.3$, $h = 9$ км). Эпицентр землетрясения расположен недалеко (19 км) от г. Облучье Еврейской а.о., где был слышен гул и отмечались сотрясения оконных стекол, интенсивность оценивается в 3 балла по шкале MSK-64 [23].

Наиболее сильное глубокофокусное землетрясение (5 на рис. 2) в регионе Приамурье и Приморье произошло 20 декабря в 09^h50^m UTC ($M^P = 4.3$, $MPSP = 4.1$, $h = 501$ км). Эпицентр находился в Японском море южнее г. Владивостока.

На рис. 3 показано изменение ежегодного числа коровых землетрясений региона с $K_p \geq 7.6$ ($M^P \geq 2.0$) и их суммарной сейсмической энергии ΣE за период 2001–2021 гг. В 2021 г. количество зарегистрированных событий невелико, ниже среднего за 20 лет, но примерно на уровне прошлого года. При этом уровень суммарной сейсмической энергии ΣE – самый низкий с начала века, что является следствием полного отсутствия сильных землетрясений в коре региона в этом году.

Ход сейсмического процесса в регионе характеризует график Беньоффа [24] на рис. 4, где для сравнения приведены данные за 2019–2021 гг. На этом графике учтены как коровые, так и глубокофокусные события. Стрелками показаны наиболее заметные землетрясения.

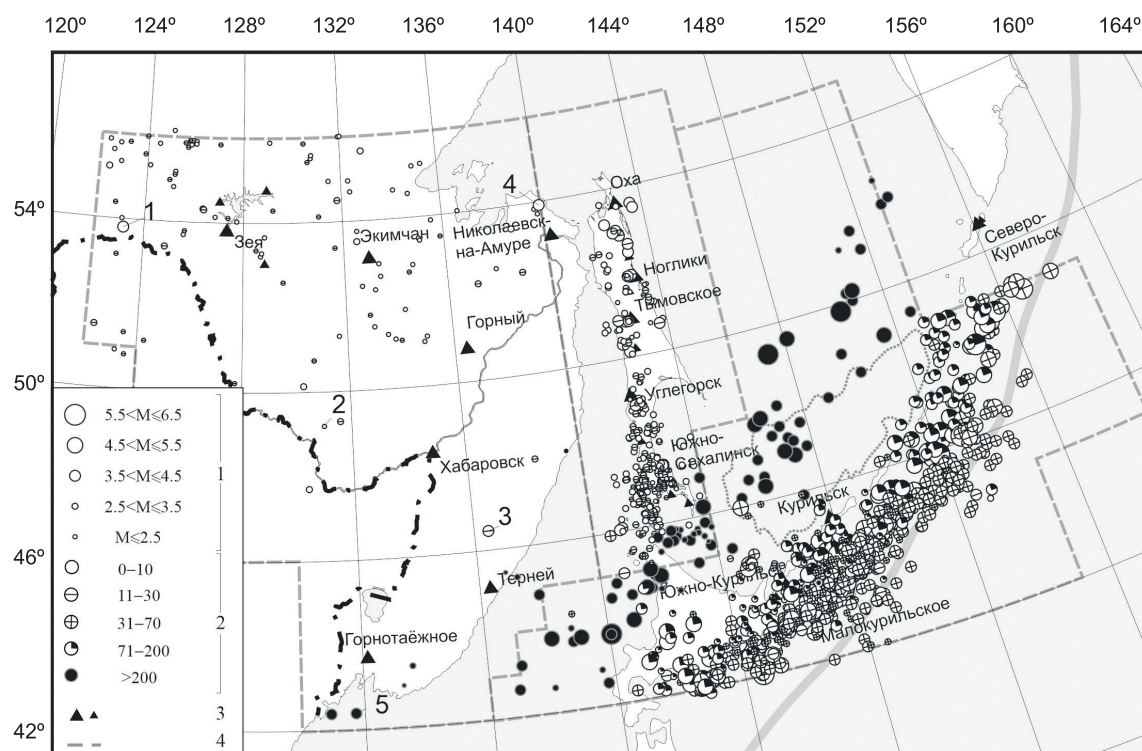


Рис. 2. Эпицентры землетрясений Приамурья и Приморья, Сахалинского и Курило-Охотского регионов в 2021 г.

1 – магнитуа M^P ; 2 – глубина h гипоцентра, км; 3 – сейсмические станции; 4 – границы регионов зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН. Нумерация землетрясений соответствует каталогу Приамурья и Приморья [Приложение PR2].

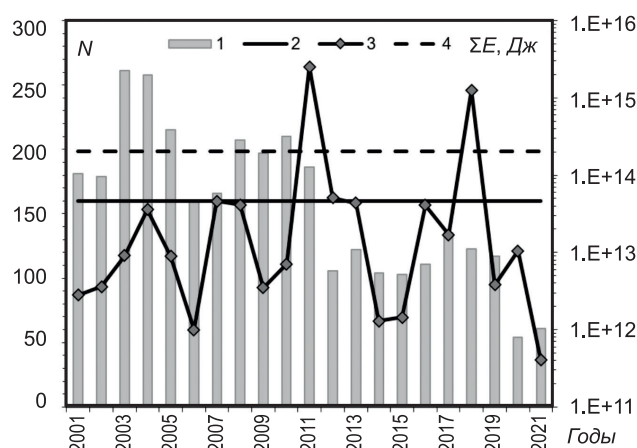


Рис. 3. Изменение ежегодного числа N землетрясений с $K_r \geq 7.6$ и суммарной сейсмической энергии ΣE коровых землетрясений Приамурья и Приморья за период 2001–2021 гг.

1 – N ; 2 – среднегодовое число N_{cp} землетрясений с $K_r \geq 7.6$ за 2001–2020 гг.; 3 – ΣE ; 4 – среднегодовое значение суммарной сейсмической энергии ΣE_{cp} за 2001–2020 гг.

Наибольшую ступень на графике за три последних года образует событие 28 февраля 2020 г. с $M^P=4.9$, произошедшее в северной части региона. Наклон графика перед этим событием немного уменьшается.

В 2021 г. наиболее выделяется на графике серия событий в мае–июне с магнитудой $M^P=3.9–4.1$, ни одно из которых нельзя отнести к сильным. Их суммарная условная деформация создает заметную ступень на уровне фоновой сейсмичности. Наиболее сильное глубокофокусное событие года 20 декабря с $M^P=4.3$ почти не выделяется, отчасти это связано с тем, что энергия коровых событий определяется по формуле (2), а глубокофокусных – по формуле (3), которая дает меньшее ее значение при той же M^P . Общий наклон графика в 2021 г. остается примерно постоянным, характерным спокойному периоду с фоновой сейсмичностью.

В каталог *Сахалинского региона* 2021 г. [Приложение SH3] включены параметры 411 событий, включая 28 глубокофокусных землетрясений. 23 события каталога идентифицированы как «взрыв» и при анализе сейсмичности не учитывались.

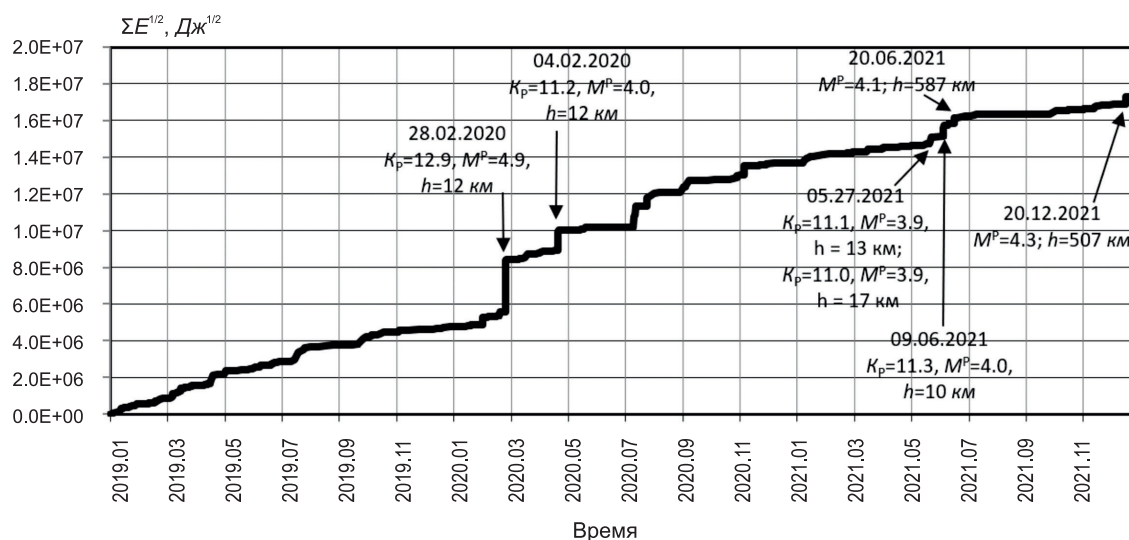


Рис. 4. График Бенъоффа региона Приамурье и Приморье за 2019–2021 гг.

Макросейсмические проявления зарегистрированы в 23 случаях [Приложение SH6], для семи событий есть определения механизма очага [Приложение SH4]. Отдельно обзор сейсмичности Южного Сахалина по данным локальной сети приведен в [25].

Глубины землетрясений, отнесенных к коровым, лежат в диапазоне $h=2\text{--}15$ км, их эпицентры вытянуты вдоль основных разломных систем острова в меридиональном направлении (рис. 5). В эту же группу событий были условно отнесены семь землетрясений с эпицентрами возле о. Хоккайдо, чья глубина оказалась в диапазоне $h=38\text{--}69$ км. Глубокофокусные события, относящиеся к Курило-Камчатской сейсмофокальной зоне, с эпицентрами в юго-восточной части региона, произошли в диапазоне глубин $h=254\text{--}379$ км. Расчетная магнитуда землетрясений региона находится в диапазоне $M^p=1.1\text{--}4.7$.

Самое сильное по магнитуде коровое ($M^p=4.5$, $MPSP=4.5$, $h=10$ км) землетрясение в Сахалинском регионе произошло 14 июня в 01^h57^m UTC (5 на рис. 5) на шельфе, примерно на широте г. Охи. Заметных сотрясений оно не вызвало.

Событие с наиболее высокой зарегистрированной макросейсмической интенсивностью произошло 18 апреля в 18^h16^m UTC ($M^p=4.2$, $MPSP=4.2$, $h=4$ км). Эпицентр землетрясения (2 на рис. 5) расположен вблизи (12 км) пос. Тымовское, где интенсивность вызванных им сотрясений оценивается в 5–6 баллов. Жители отмечали раскачивание и тряску домов, открывание дверей шкафов, падение небольших предметов с полок и подоконников, раскачивание люстр и висячих предметов, падение картин со стен. Разрушились печные трубы из кирпича на старых двухэтажных зданиях. В школе потрескалась и осыпалась штукатурка. Многие слышали гул. Люди выбегали из домов и долго стояли на улице. Интенсивность сотрясений в поселках Восход (9 км), Белое (13 км), Воскресеновка (15 км) оценивается в 5 баллов; Красная Тымь (14 км) – 4–5 баллов [Приложение SH6].

Механизм очага землетрясения (рис. 5) 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. В течение нескольких последующих дней в очаговой зоне землетрясения было зарегистрировано несколько десятков афтершоков, три из которых также вызвали ощутимые сотрясения (2 балла). Не все из афтершоков вошли в каталог [Приложение SH3], т.к. многие события регистрировались только ближайшей сеймостанцией ТУУ («Тымовское»).

Продолжилась сейсмическая активизация в Углегорском районе Сахалинской области, где 13 сентября 2020 г. произошло два ощутимых землетрясения с $MPSP=5.1$ и 4.5 [1]. Наиболее сильным из зарегистрированных здесь землетрясений в 2021 г. оказалось событие 16 октября в 22^h24^m UTC с $M^p=3.9$, $h=12$ км (10 на рис. 5). Для этого и еще пяти землетрясений методом полярности первых вступлений были рассчитаны механизмы очага, чему способствовало открытие двух новых пунктов сейсмологических наблюдений в этом районе (см. выше) и временная сеть сеймостанций Центрального отделения ФИЦ ЕГС РАН, действовавшая в 2021 г. на востоке Ха-

баровского края. Детальное описание и тектоническая привязка этих событий дана в статье [6]. Часть землетрясений авторы указанной статьи относят к естественной сейсмичности, часть (7, 8 и 10 на рис. 5), произошедшую вблизи активно эксплуатируемого Солнцевского угольного разреза, – к смешанной природно-техногенной. Механизмы очагов этих трех событий сдвигового типа с ориентацией оси сжатия на СВ–ЮЗ, а оси растяжения на СЗ–ЮВ, в то время как отнесенные к естественной сейсмичности произошли в условиях субмеридионального сжатия либо растяжения с горизонтальной нейтральной осью.

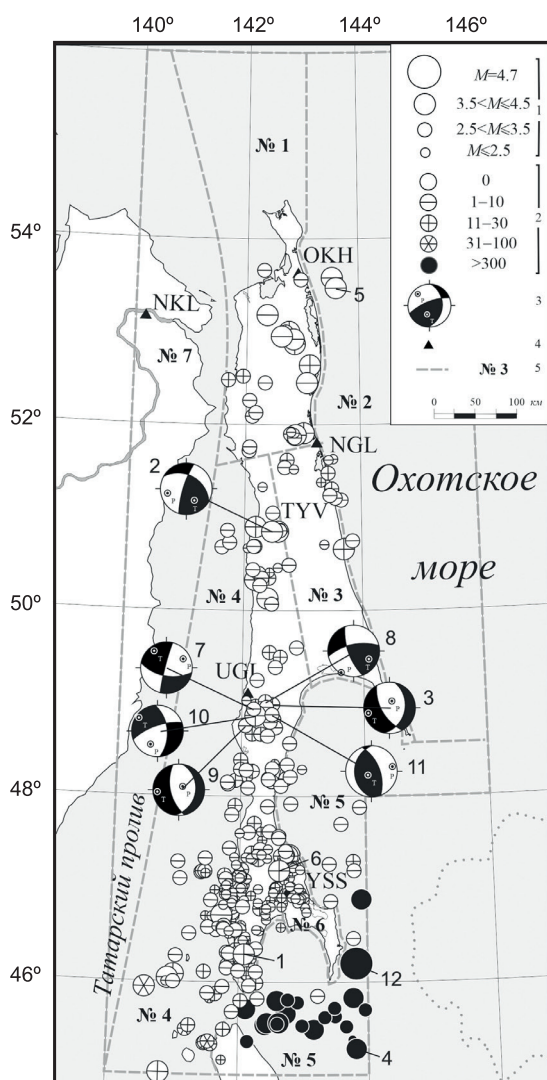


Рис. 5. Землетрясения Сахалинского региона в 2021 г.

1 – магнитуда M^P ; 2 – глубина h гипоцентра, км; 3 – стереограмма механизма очага в проекции на нижнюю полусферу, зачернены области сжатия; 4 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН; 5 – граница региона и сейсмоактивных районов, номера сейсмоактивных районов. Нумерация землетрясений соответствует каталогу Сахалинского региона [Приложение SH3].

Самое сильное глубокофокусное землетрясение в Сахалинском регионе произошло 31 октября в 19^h51^m UTC с $M^P=4.7$, $MPSP=4.2$, $h=347$ км (12 на рис. 5). Эпицентр находится в Охотском море к востоку от Тонино-Анивского п-ва. На поверхности это землетрясение не ощущалось.

На рис. 6 показано изменение ежегодного числа N мелкофокусных землетрясений региона с $M^P \geq 3.0$ и их суммарная сейсмическая энергия ΣE за период 2001–2021 гг. Как видно из диаграммы, в 2021 г. количество землетрясений и величина суммарной сейсмической энергии остаются на довольно низком уровне, существенно ниже средних значений за весь показанный период, что является следствием отсутствия сильных коровых землетрясений и вызванных ими сейсмических активизаций.

На рис. 7 представлен график Беньоффа, характеризующий ход сейсмического процесса в Сахалинском регионе в течение 2019–2021 гг., где учтены коровые и глубокофокусные землетрясения с магнитудой $M^P \geq 2.2$. Сильнейшим в рассматриваемый период остается глубокофокусное землетрясение 30 ноября 2020 г. с $M^P=6.3$, $MPSP=6.2$, создавшее большую ступень на графике.

Поскольку это событие не повлияло на коровую сейсмичность и не сопровождалось афтершоками, изменения наклона графика Беньоффа до и после него не отмечается, наклон на остальных участках практически не меняется. На рис. 7 показано положение наиболее сильных землетрясений 2021 г. магнитудой $M^P=4.3–4.7$, которые заметных ступеней на графике не создают, являясь частью фоновой сейсмичности.

В региональный каталог *Курило-Охотского региона* [Приложение KL2] включены параметры 1172 землетрясений с $M^P=1.7–6.1$. Гипоцентры 822 землетрясений (70.1%) находятся в верхнем глубинном интервале $h \leq 70$ км, 313 (26.7%) – в интервале промежуточных глубин $h=71–300$ км, 37 событий (3.2%) относятся к глубокофокусным $h > 300$ км. Детально распределение событий по глубине представлено на рис. 8.

Согласно данным СФ ФИЦ ЕГС РАН, от 43 землетрясений с эпицентрами в Курило-Охотском регионе в 2021 г. зарегистрирован макросейсмический эффект [Приложение KL6]. Максимальная интенсивность сотрясений по шкале MSK-64 [23] составила 5 баллов.

Для 38 событий региона было получено решение тензора сейсмического момента центроида [Приложение KL4].

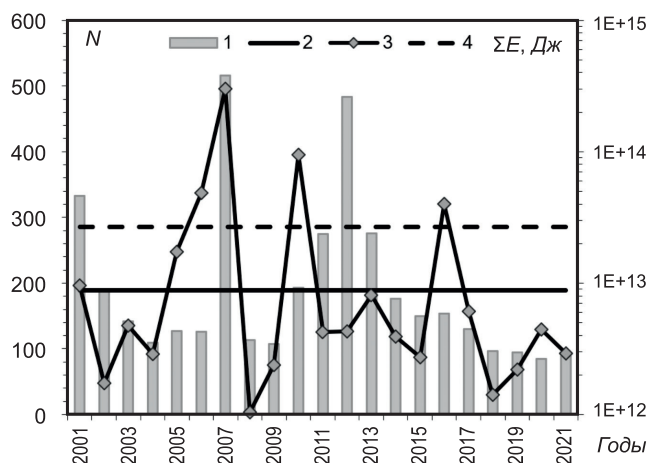


Рис. 6. Изменение ежегодного числа N землетрясений с $M^P \geq 3.0$ и суммарной сейсмической энергии ΣE мелкофокусных землетрясений Сахалина за период 2001–2021 гг.

1 – N ; 2 – среднегодовое число $N_{\text{ср}}$ землетрясений с $M^P \geq 3.0$ за 2001–2020 гг.; 3 – ΣE ; 4 – среднегодовое значение суммарной сейсмической энергии $\Sigma E_{\text{ср}}$ за 2001–2020 гг.

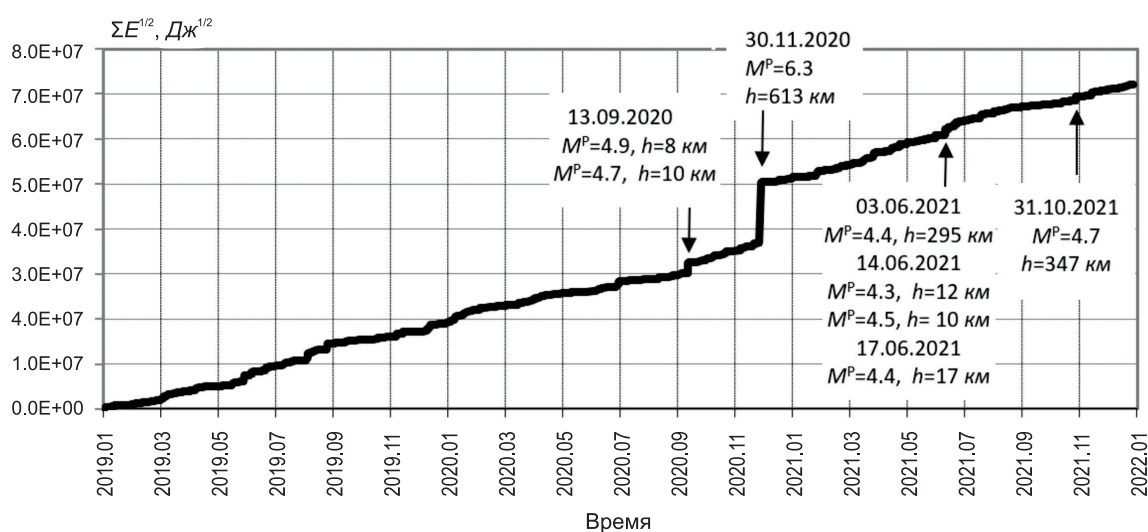


Рис. 7. График Бенюффа землетрясений Сахалинского региона за 2019–2021 гг.

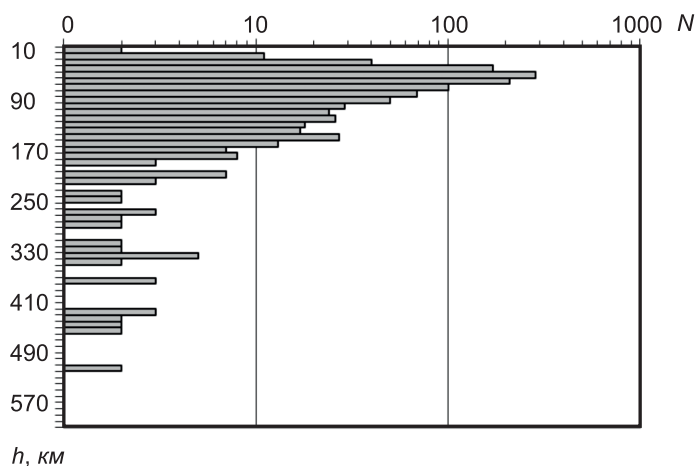


Рис. 8. Распределение землетрясений Курило-Охотского региона 2021 г. по глубине гипоцентра h , км

На рис. 9 приведены эпицентры и механизмы очагов землетрясений Курило-Охотского региона в 2021 г. Большая часть эпицентров зарегистрированных событий располагается между островной дугой и осью Курило-Камчатского глубоководного желоба (серая полоса) напротив Южных Курил, что отвечает как высокой сейсмичности этого района, так и лучшим регистрационным возможностям региональной сейсмологической сети с учетом привлечения данных сеймостанций Хоккайдского университета. В каталоге землетрясений Международного сейсмологического центра ISC [4] присутствует еще 107 событий Курило-Охотского региона в диапазоне магнитуд

$m_b=2.8-4.9$, которые не были зарегистрированы сетью Сахалинского филиала [Приложение KL3]. Эпицентры пропущенных землетрясений располагаются в основном в районе Средних Курил, в акватории Охотского моря, а также западнее о. Хоккайдо.

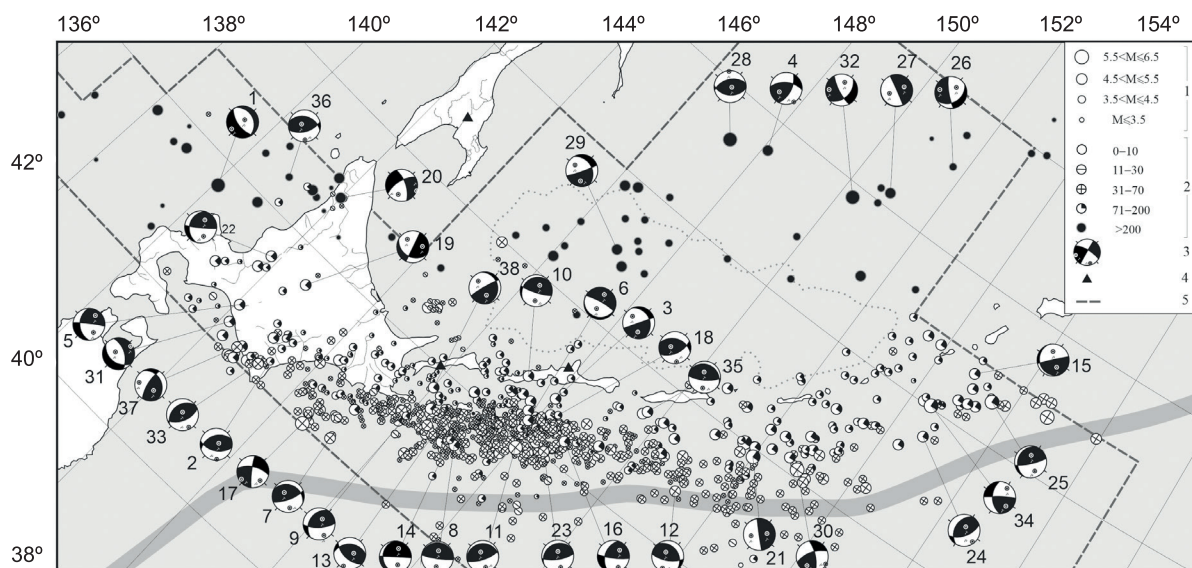


Рис. 9. Эпицентры и механизмы очагов землетрясений Курило-Охотского региона в 2021 г.

1 – магнитуда M^P ; 2 – глубина h гипоцентра, км; 3 – стереограмма механизма очага в проекции на нижнюю полусферу, зачернены области сжатия; 4 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН; 5 – граница региона.

Нумерация землетрясений соответствует каталогу Курило-Охотского региона [Приложение KL2].

В 2021 г. только два сейсмических события Курило-Охотского региона можно отнести к сильным по магнитуде ($M^P \geq 6.0$). Одно из них произошло 12 января в 02^h39^m UTC ($M^P=6.0$, $M_{W_{GCMT}}=6.0$, $h=203$ км) восточнее о. Хоккайдо на промежуточной глубине (1 на рис. 9). На территории Сахалинской области и Приморья оно не ощущалось, однако отмечались сотрясения силой I–II балла шкалы JMA [26] на западном побережье о. Хоккайдо [4, Приложение KL6]. Механизм очага относительно поверхности классифицируется как сброс, обе нодальные плоскости ориентированы субширотно.

Второе событие ($M^P=6.1$, $M_{W_{GCMT}}=6.2$, $h=61$ км) произошло 20 сентября в 20^h25^m UTC в центральной части Курильской островной дуги (30 на рис. 9). Оно ощущалось жителями Южных Курильских островов. Так, в с. Рейдово (392 км) и г. Курильске (404 км) интенсивность сотрясений оценивается в 2–3 балла. Механизм очага землетрясения 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.

Максимальная в 2021 г. интенсивность сотрясений от землетрясений региона была отмечена в результате события 2 марта в 21^h22^m UTC ($M^P=5.8$, $M_{W_{GCMT}}=5.8$, $h=51$ км). Эпицентр расположен восточнее о. Шикотан (11 на рис. 9). Интенсивность в 5 баллов MSK-64 была зарегистрирована в пос. Малокурильское, в других населенных пунктах Южных Курил сила сотрясений достигала 4 баллов. Землетрясение произошло в зоне контакта Тихоокеанской и Охотоморской литосферных плит, механизм очага – пологий надвиг с нодальными плоскостями, ориентированными вдоль островной дуги.

На рис. 10 показано изменение ежегодного числа землетрясений региона с $M^P \geq 4.3$ и их суммарной сейсмической энергии в 2001–2021 гг.

В верхнем глубинном диапазоне $h \leq 70$ км (рис. 10 а), где в основном регистрируются землетрясения, относящиеся к зоне контакта Тихоокеанской и Охотской литосферных плит, число землетрясений с магнитудой $M^P \geq 4.3$ в 2021 г. примерно соответствует среднему уровню предыдущих лет, суммарная сейсмическая энергия существенно ниже средней, которая определяется наиболее сильными событиями за двадцатилетие, но также примерно на уровне предыдущих наиболее спокойных годов. В нижних глубинных диапазонах (рис. 10 б) в 2021 г. зарегистрировано самое большое число событий с $M^P \geq 4.3$ за рассматриваемый временной период, однако их суммарная сейсмическая энергия также невелика, примерно на уровне предыдущих лет.

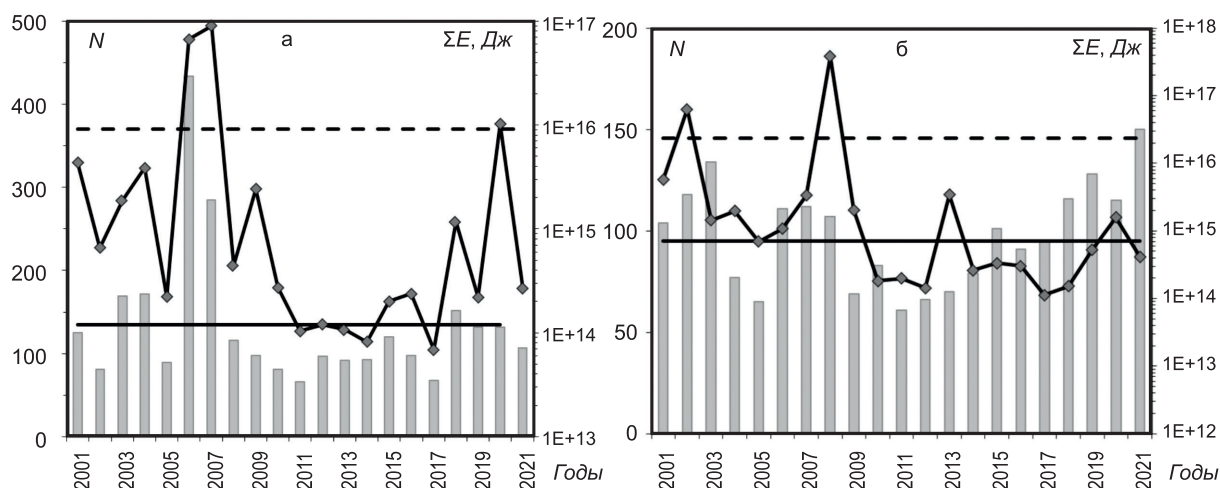


Рис. 10. Распределение числа землетрясений с $M^P \geq 4.3$, $h \leq 70$ км (а) и $h > 70$ км (б), и величины их суммарной сейсмической энергии ΣE Курило-Охотского региона за 2001–2021 гг.

Условные обозначения как на рис. 6.

На рис. 11 представлен график Бенъоффа, характеризующий ход сейсмического процесса в Курило-Охотском регионе в течение 2019–2021 гг. Примерно одинаковый наклон графика может свидетельствовать об отсутствии областей затишья или активизации перед сейсмическими событиями регионального масштаба. На графике видны ступени, соответствующие наиболее сильным событиям предыдущего года с $M^P=6.9$ и $M^P=7.5$. Два сильных землетрясения 2021 г., отмеченные выше, создают на графике едва заметную ступень, их можно отнести к фоновой сейсмичности.

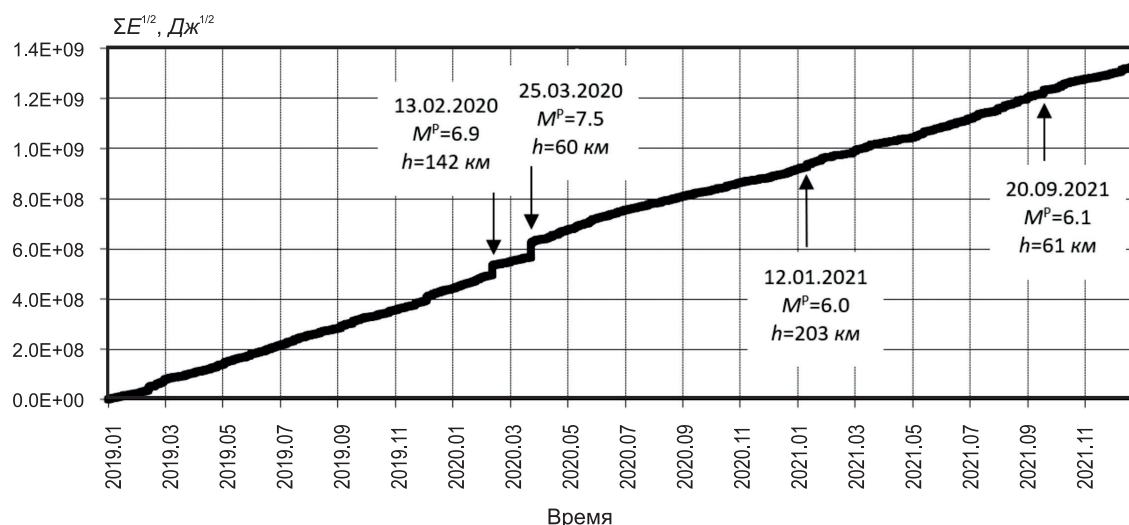


Рис. 11. График Бенъоффа для землетрясений Курило-Охотского региона за 2019–2021 гг.

Заключение. В 2021 г. сейсмичность в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН оставалась умеренной, без сильных землетрясений. Все упомянутые в статье события можно отнести к фоновым.

В Приамурье и Приморье в 2021 г. наблюдалась рассеянная слабая сейсмичность, величина выделившейся суммарной сейсмической энергии в этом году наименьшая с начала века.

В Сахалинском регионе можно отметить событие в Тымовском районе, несмотря на небольшую магнитуду, вызвавшее сильные сотрясения в районном центре. Интенсивность сотрясений оценивается в 5–6 баллов, что объясняется близостью эпицентра к поселку и малой глубиной очага. Также отмечается повышенная сейсмическая активность в районе угледобычи в Углегорском районе, для регистрации которой в 2021 г. развернуты два дополнительных пункта наблюдений. Скопления эпицентров землетрясений региона вытянуты вдоль острова, концентрируясь вокруг основных региональных разломных зон.

Большая часть землетрясений Курило-Охотского региона по-прежнему расположена между островной дугой и глубоководным желобом в зоне контакта литосферных плит, плотность эпицентров возрастает в районе Южных Курил и о. Хоккайдо, что объясняется повышенной сейсмичностью этой территории и лучшими условиями регистрации. В 2021 г. отмечается увеличение количества землетрясений с глубиной очага $h > 70$ км и эпицентрами под островной дугой и в акватории Охотского и Японского морей, хотя энергия этих событий остается примерно на прежнем уровне. Наиболее сильное как для региона, так и для всей зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН событие произошло 20 сентября в 20^h25^m UTC в центральной части Курильской островной дуги, $M^p=6.1$, $h=61$ км. Это рядовое для региона событие вызвало небольшие сотрясения на южном фланге островной гряды.

Исследование выполнено в рамках государственного финансирования Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание № 075-00604-25) с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

В подготовке электронных приложений к данной статье принимали участие Авдеева Л.И., Величко Л.Ф., Дорошквич Е.Н., Карташова О.Л., Коргун Н.В., Костылев Д.В., Костылева Н.В., Кругова И.П., Лукаш Н.А., Лысенко Т.Н., Михайлов В.И., Паршина И.А., Пиневич М.В., Сафонов Д.А., Рунова А.И., Семенова Е.П., Ферчева В.Н., Фокина Т.А., Швидская С.В.

Электронные приложения (<http://www.gsras.ru/zse/app-28.html>):

App08_Priamurye_Primorye_2021: PR1 – Сейсмические станции Приамурья и Приморья в 2021 г.; PR2 – Каталог землетрясений и взрывов Приамурья и Приморья за 2021 г.; PR3 – Макросейсмический эффект землетрясений Приамурья и Приморья в населенных пунктах в 2021 г.; PR4 – Сведения о пунктах, для которых имеется информация о макросейсмических проявлениях землетрясений Приморья и Приамурья за 2021 г.

App09_Sakhalin_2021: SH1 – Стационарные сейсмические станции и сеть цунами Сахалина в 2021 г.; SH2 – Локальная сеть сейсмических станций Сахалина в 2021 г.; SH3 – Каталог землетрясений и взрывов Сахалина за 2021 г.; SH4 – Каталог механизмов очагов землетрясений Сахалина за 2021 г.; SH5 – Дополнение к каталогу механизмов очагов землетрясений Сахалина за 2021 г.; SH6 – Макросейсмический эффект ощутимых землетрясений Сахалина в 2021 г.; SH7 – Сведения о пунктах, для которых имеется информация о макросейсмических проявлениях землетрясений Сахалина за 2021 г.

App10_Kurily-Okhotsk_2021: KL1 – Стационарные сейсмические станции Курило-Охотского региона в 2021 г.; KL2 – Каталог землетрясений Курило-Охотского региона за 2021 г.; KL3 – Дополнение к каталогу землетрясений Курило-Охотского региона за 2021 г. по данным ISC; KL4 – Каталог механизмов очагов землетрясений Курило-Охотского региона за 2021 г.; KL5 – Дополнение к каталогу механизмов очагов землетрясений Курило-Охотского региона за 2021 г.; KL6 – Макросейсмический эффект ощутимых землетрясений Курило-Охотского региона и прилегающих территорий в населенных пунктах в 2021 г.; KL7 – Сведения о пунктах, для которых имеется информация о макросейсмических проявлениях землетрясений в Курило-Охотском регионе за 2021 г.

Л и т е р а т у р а

1. Сафонов Д.А., Фокина Т.А., Костылев Д.В. Сейсмичность Приамурья и Приморья, Сахалина и Курило-Охотского региона в 2020 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020). – С. 148–161. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.13> EDN: GWQRAP
2. Сейсмологический бюллетень (сеть телесейсмических станций), 2021. (2025) // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. – URL: http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2021
3. Japan Meteorological Agency. (2025). – URL: <https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>
4. International Seismological Centre. (2025). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
5. National Earthquake Data Center. (2025). – URL: <http://data.earthquake.cn/index.html>
6. Костылев Д.В., Богинская Н.В. Сейсмический мониторинг района угледобычи на о. Сахалин с использованием временных сетей ФИЦ ЕГС РАН // Геодинамика и Тектонофизика. – 2022. – 13(2):0634. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0634>
7. Костылев Д.В. Формирование единой системы сбора сейсмологической информации в Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 1. – С. 41–53. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.03>
8. Границы регионов и субрегионов (территорий) Северной Евразии в 2021 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – С. 351–352.
9. Дягилев Р.А. Программа расчета регистрационных возможностей сейсмических сетей и групп, SARra: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2020662170 от 09.10.2020 г. М.: РОСПАТЕНТ, 2020.
10. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика (Труды ИФЗ АН СССР; № 32 (199)). – М.: Наука, 1964. – С. 88–93.
11. Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности (Труды ИФЗ АН СССР; № 9 (176)). – М.: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 75–114.

12. Ким Ч.У., Сен Р.С. Результаты сейсмических исследований в окрестности Южно-Сахалинска с использованием цифровой сейсмической станции DATAMARK // Очаги сильных землетрясений Дальнего Востока. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – С. 163–175.
13. Соловьёв С.Л., Соловьёва О.Н. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой Курильских землетрясений // Физика Земли. – 1967. – № 2. – С. 13–23.
14. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР / Отв. сост. Кондорская Н.В., Аранович З.И., Шебалин Н.В. – М.: Наука, 1982. – 273 с.
15. Волкова Л.Ф., Поплавская Л.Н., Соловьёва О.Н. Шкалы MPVA, MSHA для определения магнитуд близких глубоководных землетрясений Дальнего Востока // Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР. Методические работы ЕССН. – М.: Наука, 1989. – С. 81–85.
16. Richter C.F. An Instrumental Earthquake Magnitude Scale // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1935. – V. 25, N 1. – P. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.1785/BSSA0250010001>
17. Safonov D.A., Semenova E. P. Regional magnitude Mwa in the Russian Far East // Seismic Instruments. – 2022. – V. 58, N 1. – P. S42–S57. DOI: <https://doi.org/10.3103/S074792392207009X>
18. Sokos E., Zahradnik J. Evaluating Centroid Moment Tensor Uncertainty in the New Version of ISOLA Software // Seismological Research Letters. – 2013. – V. 84. – P. 656–665.
19. Сафонов Д.А., Коновалов А.В. Использование программы ISOLA для определения тензора сейсмического момента землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов // Тихоокеанская геология. – 2017. – Т. 36, № 3. – С. 102–112.
20. Соловьёв С.Л., Соловьёва О.Н. Скорость колебания земной поверхности в объемных волнах неглубоководных Курило-Камчатских землетрясений на расстояниях до 17° // Физика Земли. – 1967. – № 1. – С. 37–60.
21. Соловьёва О.Н., Соловьёв С.Л. Новые данные о динамике сейсмических волн неглубоководных Курило-Камчатских землетрясений // Проблемы цунами. – М.: Наука, 1968. – С. 75–97.
22. Гутенберг Б., Рихтер К.Ф. Магнитуда, интенсивность, энергия и ускорение как параметры землетрясений (II) // Слабые землетрясения. – М.: ИЛ, 1961. – С. 72–119.
23. Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Международная шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
24. Benioff H. Earthquakes and rock creep // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1951. – V. 41, N 1. – P. 31–62.
25. Коргун Н.В., Семенова Е.П. Юг о. Сахалин // Землетрясения России в 2021 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 111–115.
26. Kawasumi H. Measures of earthquake danger and expectancy of maximum intensity throughout Japan as inferred from seismic activity in historical time // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1951. – V. 21. – P. 469–481.

***SEISMICITY of the AMUR and PRIMORYE, SAKHALIN
and the KURIL-OKHOTSK REGION in 2021***

D.A. Safonov¹, E.P. Semenova², D.V. Kostylev^{1,2}

¹*Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, d.safonov@imgg.ru*

²*Sakhalin branch of Geophysical Survey RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, semenova@seismo.sakhalin.ru*

Abstract. A review of the Amur and Primorye, Sakhalin, and the Kuril-Okhotsk region seismicity for 2021 is presented on the basis of data from the regional network of stationary seismic stations of the Sakhalin branch of the Geophysical Survey RAS (SB GS RAS) with the involvement of data from adjacent seismological Russian and foreign agencies. Parameters of 1703 seismic events have been determined. Focal mechanisms were calculated for 45 earthquakes, 67 earthquakes have shown a macroseismic effect. A map of the epicenters is presented, the distribution of the number of crustal and deep-focus earthquakes by a magnitude, a total seismic energy in comparison with the average parameters from previous years. The significant seismic events are described. The seismicity in the SB GS RAS area of responsibility remained moderate, and all the events mentioned in the article can be attributed to background events.

Keywords: earthquake, seismicity, magnitude, seismic energy.

For citation: Safonov, D.A., Semenova, E.P., & Kostylev, D.V. (2025). [Seismicity of the Amur and Primorye, Sakhalin and the Kuril-Okhotsk region in 2021]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021), 150–161. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.13> EDN: NFCBPH

References

1. Safonov, D.A., Fokina, T.A., & Kostylev, D.V. (2024). [Seismicity of the Amur and Primorye, Sakhalin and the Kuril-Okhotsk region in 2020]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020), 148–161. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.13> EDN: YUDPGA
2. GS RAS. (2025). Bulletin of Teleseismic Stations, 2021. Retrieved from http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2021/
3. Japan Meteorological Agency. (2025). Retrieved from <https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>
4. International Seismological Centre. (2025). On-line Bulletin. Retrieved from <https://doi.org/10.31905/D808B830>.
5. National Earthquake Data Center. (2025). Retrieved from <http://data.earthquake.cn/index.html>
6. Kostylev, D.V., & Boginskaya, N.V. (2022). Seismic Monitoring of the Coal Mining Area on Sakhalin Island Using Temporary Networks of the FRS GS RAS. *Geodynamics & Tectonophysics*, 13(2), 0634. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.5800/gt-2022-13-2s-0634>
7. Kostylev, D.V. (2021). [Formation of a unified system for collecting seismological information in the Sakhalin Branch of GS RAS]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(2): 41–53. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.03>
8. [Boundaries of regions and subregions (territories) of Northern Eurasia in 2021]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021), 351–352. (In Russ.).
9. Dyagilev, R.A. (2020). [Program for calculating registration capabilities of seismic networks and groups, SARra]. Certificate of state registration of a computer program № 2020662170. (In Russ.).
10. Rautian, T.G. (1964). [On determining the energy of earthquakes at a distance of 3000 km]. In *Eksperimental'nai seismika (Trudy IFZ AN SSSR № 32 (199))* [Experimental seismic] (pp. 88–93). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
11. Rautian, T.G. (1960). [Energy of earthquakes]. In *Metody detal'nogo izucheniya seismichnosti (Trudy IFZ AN SSSR, № 9 (176))* [Methods of Detail Study of Seismicity] (pp. 75–114). Moscow, Russia: Inst. Fiz. Zemli Akad. Nauk SSSR Publ. (In Russ.).
12. Kim, Ch.U., & Sen, R.S. (1997). [Results of seismic studies in the vicinity of Yuzhno-Sakhalinsk using a digital seismic station DATAMARK]. In *Ochagi sil'nykh zemletryasenii Dal'nego Vostoka* [The centers of strong earthquakes in the Far East] (pp. 163–175). Yuzhno-Sakhalinsk, Russia: IMGIG Publ. (In Russ.).
13. Solov'yov, S.L., & Solov'yova, O.N. (1967). [Relationship between the energy class and the magnitude of the Kuril earthquakes]. *Fizika Zemli* [Izvestiya. Physics of the Earth], 2, 13–23. (In Russ.).
14. *Instruktsiia o poriadke proizvodstva i obrabotki nabliudeniia na seismicheskikh stantsiiakh Edinoi sistemy seismicheskikh nabliudeniia SSSR* [Instructions on the procedure for the production and processing of observations at seismic stations of the Unified Seismic Observation System of the USSR]. (1982). Moscow, Russia: Nauka Publ., 273 p. (In Russ.).
15. Volkova, L.F., Poplavskaya, L.N., & Solov'yova, O.N. (1989). [MPVA, MSHA scales for determining magnitudes of nearby deep focus earthquakes in the Far East]. In *Seismologicheskie nablyudeniia na Dal'nem Vostoke SSSR. Metodicheskie raboty ESSN* [Seismological observations in the Far East of the USSR. Methodological work of ECHS] (pp. 81–85). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
16. Richter, C.F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the seismological society of America*, 25(1), 1–32.
17. Safonov, D.A., & Semenova, E.P. (2022). Regional magnitude M_{wa} in the Russian Far East. *Seismic Instruments*, 58(1), S42–S57. DOI: <https://doi.org/10.3103/S074792392207009X>
18. Sokos, E., & Zahradník, J. (2013). Evaluating Centroid Moment Tensor Uncertainty in the New Version of ISOLA Software. *Seismological Research Letters*, 84, 656–665.
19. Safonov, D.A., & Konovalov, A.V. (2017). [Moment tensor inversion in the Kuril-Okhotsk and Sakhalin Regions using ISOLA software]. *Tikhookeanskaya geologiya* [Pacific geology], 36(3), 102–112. (In Russ.).
20. Solov'yov, S.L., & Solov'yova, O.N. (1967). [Earth surface oscillation velocity in body waves of shallow focus Kuril-Kamchatka earthquakes at distances up to 17°]. *Fizika Zemli* [Izvestiya. Physics of the Solid Earth], 1, 37–60. (In Russ.).
21. Solov'yov, S.L., & Solov'yova, O.N. (1968). [New data on the dynamics of seismic waves of shallow focus Kuril-Kamchatka earthquakes]. In *Problemy cunami* [Tsunami problems] (pp. 75–97). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
22. Medvedev, S.V., Shponhoyer, V., & Karnik, V. (1965). *Mezhdunarodnaya shkala seysmicheskoy intensivnosti MSK-64* [MSK-64 International seismic intensity scale]. Moscow, Russia: MGK Academy of Sciences USSR Publ., 11 p. (In Russ.).
23. Gutenberg, B., & Richter, K.F. (1961). [Magnitude, intensity, energy and acceleration as parameters of earthquakes (II)]. In *Slabye zemletriaseniia* [Weak earthquakes] (pp. 72–119). Moscow, Russia: IL Publ. (In Russ.).
24. Benioff, H. (1951). Earthquakes and rock creep. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 41(1), 31–62.
25. Korgun, N.V., & Semenova, E.P. (2023). [South of Sakhalin]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2021 godu* [Earthquakes in Russia, 2021] (pp. 111–115). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
26. Kawasumi, H. (1951). Measures of earthquake danger and expectancy of maximum intensity throughout Japan as inferred from seismic activity in historical time. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 21, 469–481.