

УДК 550.34

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ ЗАПАДНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

© 2023 г. А.Н. Морозов^{1*}, Н.В. Ваганова², И.М. Алешин^{1,3}

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова, Уральское отделение РАН, г. Архангельск, Россия

³ Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

*e-mail: morozovalexey@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.04.2023 г.; после доработки 17.05.2023 г.
Принята к публикации 23.05.2023 г.

Аннотация. В статье проведен анализ истории изучения сейсмичности западного сектора Российской Арктики и обобщены современные представления о сейсмичности региона. В течение всего XX в. система инструментальных наблюдений в Евразийской Арктике, частью которой является западный сектор Российской Арктики, складывалась медленно и развивалась неравномерно как во времени, так и в пространстве. Объектом исследования в основном служили сейсмоактивные районы, такие как срединно-океанические хребты, арх. Шпицберген, шельф моря Лаптевых и п-ов Таймыр. Центральная и восточная части Баренцево-Карского региона, которые входят в западный сектор Российской Арктики, всегда имели слабую инструментальную представительность и, соответственно, слабую сейсмическую изученность. Интенсивное развитие инструментальных наблюдений в Евразийской Арктике в XXI в. позволило существенно расширить наши представления о сейсмичности изучаемого региона. Наибольшая сейсмичность проявляется в пределах зоны перехода «континент–океан» и о. Белый, архипелагов Новая Земля и Северная Земля. Шельф Баренцева и Карского морей характеризуется редкой и рассеянной сейсмичностью. Однако имеющейся сети сейсмических станций недостаточно для детального изучения пространственно-временных вариаций сейсмичности отдельных сейсмоактивных зон и понимания ее связи с геолого-тектоническим строением региона и развивающимися в его пределах геодинамическими процессами. Необходимы долгосрочные исследования с помощью донных сейсмометров.

Ключевые слова: западный сектор Российской Арктики, каталог землетрясений, сейсмическая опасность, сейсмичность Арктики.

DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2023.4-7>

Цитирование: Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Алешин И.М. Сейсмическая изученность западного сектора Российской Арктики // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22, № 4. С. 67–80. <https://doi.org/10.21455/GPB2023.4-7>

ВВЕДЕНИЕ

Первое землетрясение в Арктике было инструментально зарегистрировано сейсмическими станциями мировой сети 9 октября 1904 г. [Tams, 1922], а первая стационарная станция севернее Полярного круга начала функционировать в 1906 г. в пос. Васияуре (Vassijaure) на севере Швеции [Kulhánek, 1988]. Однако из-за сложных климатических и географических условий, а также в силу исторических и экономических причин инструментальные наблюдения в Арктике в течение XX в. развивались медленно и неравномерно как во времени, так и в пространстве. Эти особенности напрямую влияли и на сейсмологическую изученность арктических территорий.

К концу 1980-х годов при описании проблем сейсмического районирования западного сектора Советской Арктики Г.Д. Панасенко [1986] отмечал, что существующая сеть отечественных и зарубежных сейсмических

станций не обеспечивает сбор материала с полнотой, которая была бы минимально достаточной для уверенного сейсмического районирования территории. Результаты немногочисленных экспедиционных исследований, которые подразумевали установку временных сейсмических станций, подтверждали неполноту наших знаний об особенностях проявления слабой сейсмичности в Арктике [Kristoffersen et al., 1982; Avemusov, 1996; Schlindwein et al., 2007; Гайцслер и др., 2018; Крылов и др., 2020].

Результаты геолого-геофизических исследований, проведенных в западном секторе Российской Арктики, показали его высокий нефтегазовый потенциал. Были открыты такие крупные месторождения, как Штокмановское, Ледовое, Лудловское, Приразломное и др. на шельфе Баренцева моря и Русановское, Ленинградское на шельфе Карского моря [Ivanova et al., 2006]. В настоящее время в рамках реализации

проектов по освоению месторождений в западном секторе Российской Арктики активно ведется проектирование и строительство промышленных систем и объектов [Завьялов, Перетокин, 2022]. Учитывая географическое положение и климатические условия Арктики, зачастую проектируемые объекты располагаются на шельфе или на суше в условиях широко распространенной здесь вечной мерзлоты.

Для оценки потенциальных природно-техногенных рисков и обеспечения безопасной эксплуатации промышленных систем и объектов при освоении крупных месторождений необходимо обобщить и уточнить наши знания о сейсмических процессах, протекающих в западном секторе Российской Арктики. В данной статье описана история изучения сейсмичности западного сектора Российской Арктики и обобщены современные представления о сейсмичности региона.

ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ ЗАПАДНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Российская Арктика, или Российский сектор Арктики, – это часть акватории и территории Арктики, на которую в соответствии с международным правом распространяется юрисдикция Российского государства [Лукин, 2012]. Российский сектор Арктики в XX в. был определен на основе разграничения арктического пространства по двум меридианам от

крайних западной и восточной точек сухопутной границы России до Северного полюса. В официальных документах, например, в «Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 г.», утвержденных Указом Президента Российской Федерации от 5 марта 2020 г. № 164, употребляется политико-правовое понятие «Арктическая зона Российской Федерации».

Арктическая зона Российской Федерации – это сухопутные территории, определенные Указом Президента Российской Федерации от 2 мая 2014 г. № 296 «О сухопутной территории Арктической зоны Российской Федерации», а также прилегающие к этим территориям внутренние морские воды, территориальное море, исключительная экономическая зона и континентальный шельф Российской Федерации. Эти территории входят в Российский сектор Арктики на основе норм международного права и российских законодательных актов.

Понятия «Арктическая зона Российской Федерации» и «Российская Арктика» по сути являются идентичными [Лукин, 2012]. Разделение на западный и восточный секторы условно. Западный сектор географически включает Баренцево и Карское моря, восточный – Восточно-Сибирское, Чукотское моря и море Лаптевых. Данное разделение совпадает с границами между Западно-Арктическим и Восточно-Арктическим секторами Евразийского шельфа, выделенными на

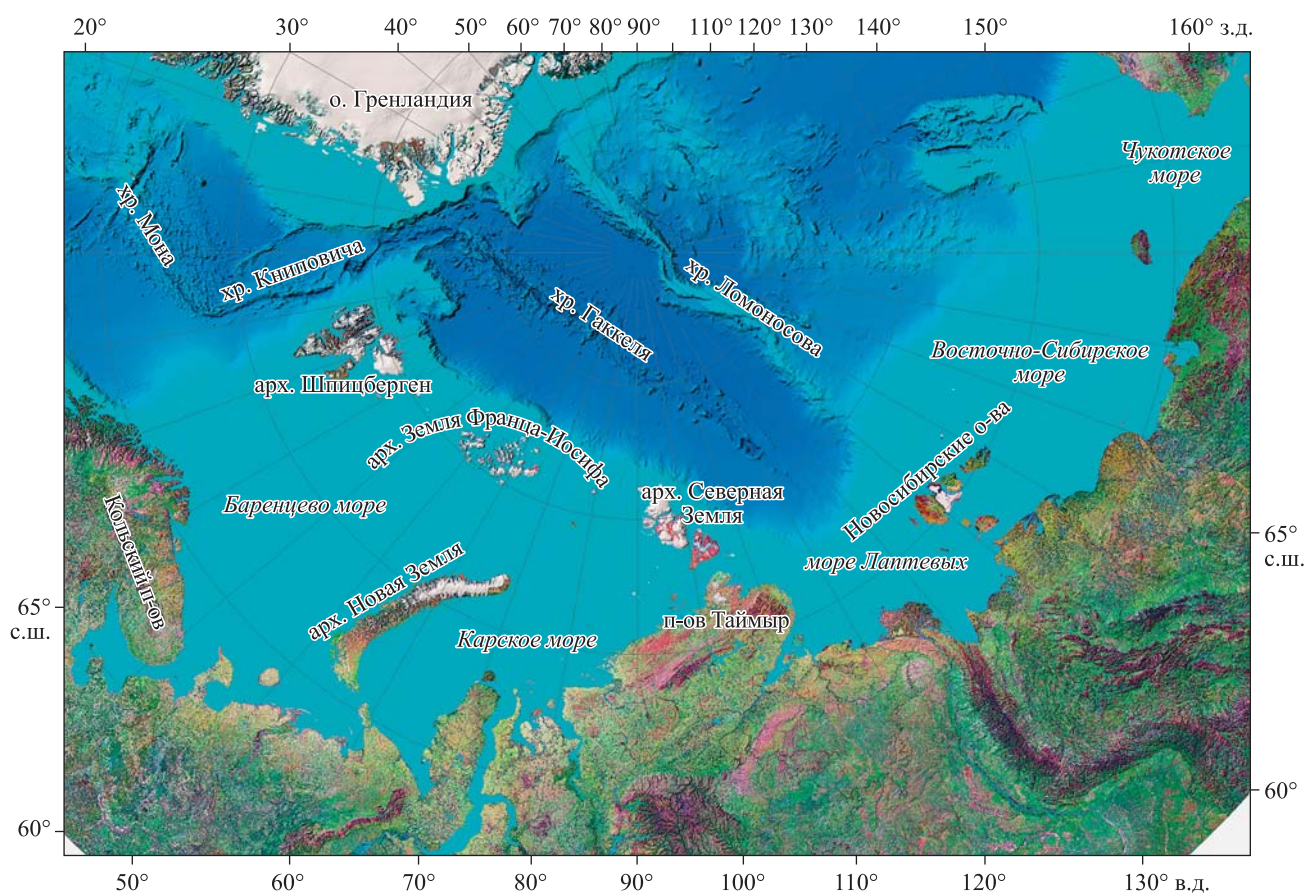


Рис. 1. Батиметрическая карта Евразийской Арктики

основе различий внутренней структуры и геодинамики в [Атлас..., 2004]. При этом море Лаптевых относится к пограничной области (рис. 1).

Описывать развитие представлений о сейсмичности западного сектора Российской Арктики нельзя без упоминания важных этапов становления инструментальных наблюдений в целом. Вплоть до 1950-х годов стационарные сейсмические наблюдения севернее Полярного круга практически не проводились (рис. 2). В основном развитие сейсмологических наблюдений происходило в сейсмоактивных регионах. Вследствие своей удаленности станции мировой сети регистрировали лишь достаточно сильные происходящие в Арктике землетрясения, но постепенно магнитудный порог снижался за счет повышения чувствительности аппаратуры и увеличения количества сейсмических станций.

Поэтому и первые представления о сейсмичности западного сектора Российской Арктики были получены по данным станций мировой сейсмической сети. На севере шельфа Баренцева моря между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа 14.10.1908 г. произошло одно из сильнейших внутриплитных землетрясений в Арктике с $M_{w,ISC} = 6.6$. Землетрясение было зарегистрировано европейскими сейсмическими станциями. Первое определение параметров эпицентра проведено в работе [Tams, 1922]. В последующих работах [Gutenberg, Richter, 1941; Линден, 1959; Новый..., 1977; Morozov et al., 2019] и в каталоге ISC–GEM (International Seismological Centre–Global Earthquake Model) [Storchak et al., 2015] параметры гипоцентра были уточнены с привлечением времен вступлений, полученных на не учтенных ранее сейсмических станциях, новых глобальных скоростных моделей и алгоритмов локаций. Последние исследования привязывают эпицентр землетрясения 1908 г. к устью жёлоба Франц-Виктория, где в 1948 г. зарегистрирована

серия сильных землетрясений: 18 февраля с $MLH = 6.3$, 26 сентября с $MLH = 5.0$ и 22 ноября с $MLH = 5.2$.

При подготовке и во время проведения Международного геофизического года (МГГ, 1957–1958 гг.) в пределах западного сектора Российской Арктики и на Европейском севере России были установлены стационарные сейсмические станции: «Апатиты» (АРА) в 1956 г. и «Хейс» (КНЕ) в 1957 г. Однако их количество и местоположение не позволяли в полной мере изучать проявление сейсмичности в регионе.

По результатам исследований в рамках МГГ было опубликовано много работ, посвященных сейсмичности Арктики (см., например, работы Н.А. Линден [1959, 1963], А.П. Лазаревой [1963] и Дж. Ходжсона с соавторами [Hodgson et al., 1965]). В работе [Линден, 1959] обобщены относящиеся к Арктике материалы инструментальных наблюдений отечественных и зарубежных сейсмических станций за период 1908–1958 гг. и на этой основе определены параметры гипоцентров 350 землетрясений. Для рассматриваемого нами региона отмечены эпицентры землетрясений 1908 и 1948 годов на севере шельфа Баренцева моря, несколько землетрясений на севере шельфа Карского моря и на территории арх. Северная Земля. Нарботки Н.А. Линден легли в основу каталога региона «Арктика» в «Атласе землетрясений в СССР» [1962] за период 1911–1957 гг.

В 1960-х годах в регионе появляются новые арктические советские сейсмические станции: «Амдерма» (AMD) в 1962 г., «Норильск» (NRI) и «Иультин» (ИЛТ) в 1964 г. Наблюдения на станции «Амдерма» не внесли большого вклада в изучение сейсмичности региона из-за малого периода функционирования станции. Практически до 1990-х годов количество советских сейсмических станций в пределах западного сектора не увеличивалось и землетрясения регистрировались только удаленными сейсмическими станциями. Инструментальные наблюдения

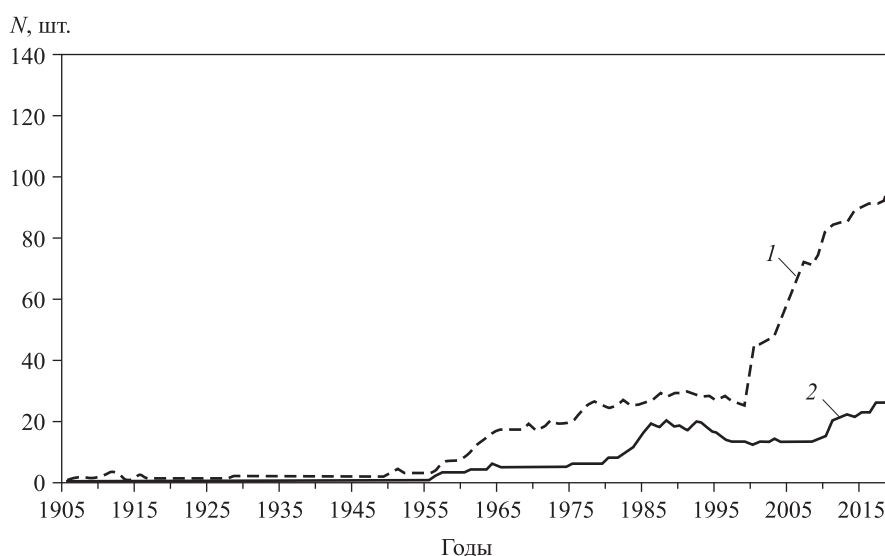


Рис. 2. Динамика изменения по годам количества стационарных сейсмических станций, функционировавших севернее Полярного круга

1 – зарубежные станции; 2 – отечественные станции

интенсивно развивались на севере Фенноскандии и на арх. Шпицберген. Как следствие, западная часть шельфа Баренцева моря практически всегда имела хорошую инструментальную представительность и была сейсмически хорошо изучена.

С целью получения дополнительных сейсмологических данных, необходимых для составления схемы сейсмического районирования, в 1968 г. сотрудниками НИИ геологии Арктики (после 1972 г. – НПО «Севморгеология») была установлена временная сейсмическая станция на о. Земля Александры арх. Земля Франца-Иосифа. Функционирование двух станций на архипелаге позволило отнести несколько зарегистрированных землетрясений к желобу Франц-Виктория и впервые к желобу Св. Анны [Аветисов, 1971]. Это позволило подтвердить факт повышенной сейсмичности желобов к западу и востоку от арх. Земля Франца-Иосифа.

В 1984 г. подобные исследования были проведены на крайней северной точке арх. Северная Земля – мысе Арктический. Также были зарегистрированы низкомагнитудные землетрясения из разных сейсмоактивных зон, которые ранее не регистрировались стационарными сейсмическими станциями из-за их удаленности [Аветисов, 1996]. Однако эти землетрясения были зарегистрированы только одной станцией и провести их локацию не представлялось возможным.

В диссертационной работе А.П. Лазаревой [1977] приведен каталог арктических землетрясений за период 1964–1974 гг. А.П. Лазарева вместе с Е.А. Хромецкой и Н.В. Шебалиным являются составителями каталога по региону «Арктика» в фундаментальной работе [Новый..., 1977]. В каталог вошли данные о 60 землетрясениях за период 1908–1974 гг., большинство из которых приурочено к срединно-океаническому хребту Гаккеля и шельфу моря Лаптевых. В пределах шельфовых территорий западного сектора количество землетрясений практически не изменилось по сравнению с данными, приведенными в [Атлас..., 1962].

В работе [Панасенко, 1986] обобщены сведения о проявлении сейсмичности в западном секторе на момент середины 1980-х годов. Автор указывает на скудость данных в силу малого количества сейсмических станций и их удаленности друг от друга. При этом на основе имеющихся данных им была построена предварительная схема общего сейсмического районирования Баренцевоморской платформы. В частности, указывалось, что эпицентры землетрясений располагаются по периферии платформы вдоль ее южной, западной и северной окраин.

Практически весь XX в. в пределах западного сектора Российской Арктики регистрировалась техногенная и индуцированная сейсмичность, вызванная деятельностью ядерного полигона на арх. Новая Земля [Khalturina et al., 2005; Адушкин, Спивак, 2007]. Только одно событие, произошедшее на архипелаге 01.08.1986 г., не связывают с индуцированной сейсмичностью. В работе [Marshall et al., 1989] по наличию четких вступлений глубинных фаз и вычисленной глубине очага (24 км) делается предположение о тектонической природе данного землетрясения, а в работе [Ассиновская, 1994] определены параметры механизма его очага: взбросовый с

субширотным горизонтальным сжатием. Результаты характеризуются в указанной работе как надежные, но однозначного мнения у сейсмологического сообщества по поводу природы этого землетрясения до сих пор нет.

После распада СССР в 1991 г. и последовавшего за этим экономического кризиса количество сейсмических станций в России заметно сократилось. При этом закрытие одних станций отчасти компенсировалось открытием новых и модернизацией действующих [Виноградов и др., 2012]. В этот период в регионе начали функционировать сейсмические станции «Ловозеро» (LVZ) и «Амдерма» (AMD), вторая станция «Норильск» (NRIL) и сейсмическая группа АР0.

Б.А. Ассиновская [1994] обобщила данные о проявлении сейсмичности в Баренцевоморском регионе на начало 1990-х годов и выполнила подробное описание зон сейсмичности, обрамляющих Баренцево море. На этой основе ею составлен унифицированный каталог землетрясений региона за период 1758–1986 гг., предложены региональные геолого-геофизические критерии сейсмичности и составлена схема возможных очагов землетрясений (ВОЗ). Оказалось, что зоны ВОЗ в Баренцевоморском регионе распределяются весьма неравномерно. Большая часть рассматриваемой территории относится к асейсмичным областям; в основном эти области располагаются в центральной части. Сейсмически активны некоторые районы Балтийского щита, большая часть Свальбардской платформы и арх. Шпицберген, районы, примыкающие к зоне Сенья и континентальному уступу Брусилова, локальные области арх. Новая Земля.

Тогда же выходит известная монография Г.П. Аветисова «Сейсмоактивные зоны Арктики» [Аветисов, 1996], в которой обобщены и проанализированы сведения об истории сейсмологических исследований в Арктике, распределении землетрясений по территории и механизмах очагов, намечены связи сейсмичности с тектоникой, высказаны соображения о геодинамике сейсмоактивных зон Арктики и месте их в ряду сейсмоактивных зон Земли. Многие годы эта книга была настольной у исследователей Арктики.

В монографии отмечается, что внутриплитная сейсмичность западного сектора Арктики обусловлена в общем случае интегральным воздействием трех факторов: внутриплитных напряжений, генерируемых процессами на границах плит; вертикальными тектоническими движениями и нагрузкой аномально быстро накапливающихся осадочных толщ.

Большой вклад в изучение современной сейсмичности Баренцевоморского региона осуществлен сотрудниками Кольской филиала Геофизической службы РАН (ныне – Кольский филиал ФИЦ ЕГС РАН). Прежде всего, это обеспечение инструментальных наблюдений на станциях российской части Баренцевоморской региональной сети сейсмомониторинга [Виноградов и др., 2012] и развитие программных и методических средств мониторинга [Асминг, 2004; Fedorov et al., 2019; Асминг и др., 2021]. Образовался целый пласт направлений исследования сейсмичности и геодинамики северо-запада России, особенно западной части Беломорского региона и арх. Шпицберген [Kremenetskaya, Asming, 1994;

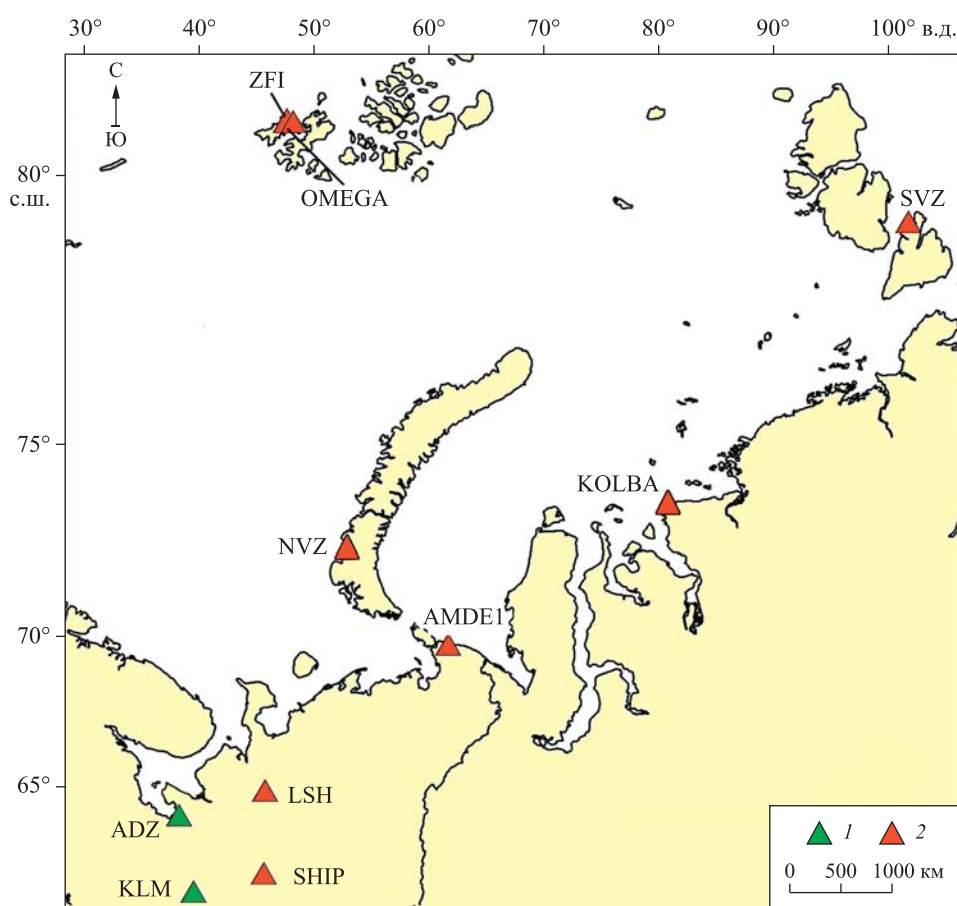


Рис. 3. Расположение станций Архангельской сейсмической сети (код сети – АН)
 1 – станции ФИЦ ЕГС РАН и ФИЦКИА УрО РАН; 2 – станции ФИЦКИА УрО РАН

Асминг и др., 1996; Кременецкая и др., 2000; Баранов и др., 2011; Виноградов, Кременецкая, 2016]. Однако количество сейсмических станций сети было недостаточным для регистрации слабой сейсмичности восточной и северной частей Баренцево-морского региона.

С 2010 по 2022 г. на архипелагах Земля Франца-Иосифа, Северная Земля, Новая Земля и на побережье Баренцева и Карского морей были установлены новые арктические стационарные сейсмические станции сети ФИЦКИА УрО РАН (код сети – АН) (рис. 3) [Антоновская и др., 2022]. В результате появилась техническая возможность для регистрации низкомагнитудных землетрясений в пределах центральной и восточной частей Евразийской Арктики. На этой основе проведены исследования по изучению проявления современной сейсмичности в западном секторе Российской Арктики и на прилегающих территориях [Morozov et al., 2015, 2017; Погожин и др., 2016; Antonovskaya et al., 2020].

Кроме того, центральным отделением ФИЦ ЕГС РАН в 2017 г. были установлены три стационарные сейсмические станции (BVNN, SBTT и HRSV) на п-ове Ямал в Ненецком автономном округе, что имело большое значение для геодинамического мониторинга шельфа

Карского моря и локации современных землетрясений в пределах арх. Новая Земля.

Все полученные на отечественных арктических станциях результаты аккумулируются в сводных каталогах по региону «Арктика» ежегодников «Землетрясения России» и «Землетрясения Северной Евразии».

Интерес зарубежных исследователей к западному сектору Российской Арктики связан, прежде всего, с анализом землетрясений, фиксируемых в районе арх. Новая Земля, где располагался Центральный ядерный полигон Министерства обороны, в рамках соблюдения Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. 16 августа 1997 г. у восточного побережья арх. Новая Земля в акватории Карского моря произошло землетрясение магнитудой $m_{b,NEIC} = 3.2$. Именно из-за района, в котором оно произошло, это «рядовое» землетрясение стало объектом повышенного научного интереса [Bowers et al., 1998; Hartse, 1998; Bowers, 2002; Kvaerna et al., 2002; Ringdal et al., 2002; Schweitzer, Kennett, 2007]. Не ослабевает внимание к региону и в настоящее время [Gibbons et al., 2016; Kvaerna et al., 2023].

Региональные зарубежные и отечественные арктические сейсмические сети развивались и функционируют независимо друг от друга. Поэтому усилия

сейсмологов направлены на объединение каталогов, бюллетеней и частично исходных данных всех региональных сейсмических сетей, функционирующих в Баренцево-Карском регионе. Это позволит создать единый уточненный каталог землетрясений, который может стать основой для будущих исследований в области сеймотектоники и геодинамики [Antonovskaya et al., 2015; Schweitzer et al., 2021]. Подобные исследования по объединению данных с целью создания сводного каталога землетрясения проводят и для восточного сектора Российской Арктики [Gvishiani et al., 2022a, b; Vorobieva et al., 2022].

Таким образом, вплоть до конца XX в. представления о сейсмичности западного сектора Российской Арктики были скудными, прежде всего, из-за малого количества сейсмических станций и их удаленности друг от друга. Только развитие инструментальных наблюдений в XXI в. дало возможность регистрировать сейсмичность в районах, ранее недоступных для

детального сейсмического мониторинга. Уже опубликовано достаточно много статей, посвященных анализу проявлений современной сейсмичности в пределах региона.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СЕЙСМИЧНОСТИ ЗАПАДНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

В статье [Морозов и др., 2022] представлен сводный уточненный и унифицированный каталог землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 г. Наибольшая сейсмичность проявляется в пределах зоны перехода «континент–океан» на севере шельфа Баренцева и Карского морей, о. Белый, архипелагов Новая Земля и Северная Земля. Собственно шельф Баренцева и Карского морей характеризуется редкой и рассеянной сейсмичностью (рис. 4).

Зона перехода «континент–океан» является одной из основных после арх. Шпицберген сейсмически

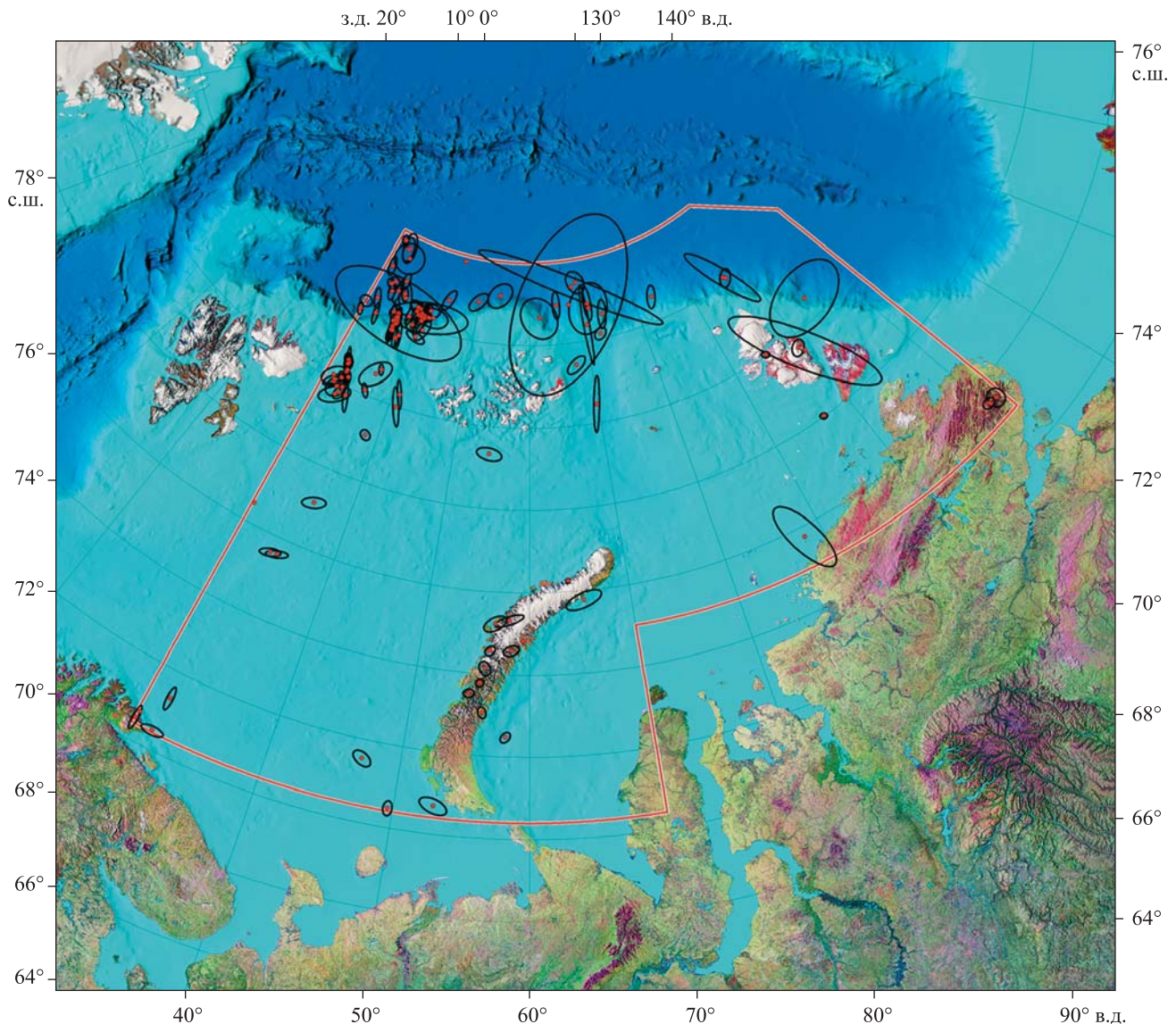


Рис. 4. Батиметрическая карта с обозначением эпицентров землетрясений из сводного уточненного и унифицированного каталога землетрясений западного сектора Российской Арктики (по [Морозов и др., 2022])

активных областей в Баренцево-Карском регионе. Землетрясение магнитудой $M_{w_{ISC}} = 6.6$, произошедшее 14.10.1908 г. в районе желоба Франц-Виктория, – одно из сильнейших внутриплитных землетрясений в Арктике. 18.02.1948 г. в этом регионе произошло второе сильное землетрясение магнитудой $MLH = 6.3$ и в том же году зарегистрированы еще два сильных землетрясения: 26 сентября магнитудой $MLH = 5.0$ и 22 ноября с $MLH = 5.2$. Следующая активизация отмечена здесь 13 и 14 марта 1967 г., когда произошли два землетрясения магнитудами $MLH = 4.4$ и $MLH = 4.7$. В дальнейшем магнитуды землетрясений в западном секторе были значительно меньшими, чем в первой половине XX в.

За период 2012–2020 гг. в пределах зоны перехода «континент–океан» на арх. Земля Франца-Иосифа было зарегистрировано 192 землетрясения, из числа которых 87 землетрясений зарегистрировано тремя и более станциями, 36 землетрясений – двумя станциями, а 69 землетрясений – только одной станцией. Магнитуды (ML) зарегистрированных землетрясений варьировали от 0.7 до 3.9 (рис. 5), а почти половина имела магнитуду 2.1 или ниже.

Эпицентры зарегистрированных землетрясений распределены в пределах района исследования неравномерно (см. рис. 5). Прослеживается приуроченность эпицентров либо к отрицательным морфоструктурам континентального склона – желобам (грабенам), либо к положительным – поднятиям. Большая часть землетрясений зарегистрирована на желобах Франц-Виктория и Св. Анны.

На рис. 6 показаны значения сейсмической активности [Ризниченко, 1979], вычисленные для зоны перехода «континент–океан» с помощью программы «Seisactivity» [Алешин, Морозов, 2022]. Использовался

метод постоянной точности с перекрытием при картировании значений сейсмической активности. Наибольшие значения сейсмической активности характерны для района желобов Франц-Виктория и Св. Анны, а также для о. Белый.

Только для четырех землетрясений в пределах района исследования вычислены параметры механизма очага [Аветисов, 1996]. Для двух землетрясений, произошедших в пределах желоба Франц-Виктория 18.02. и 22.11.1948 г., имеющиеся у разных авторов [Мишарина, 1967; Ассиновская, 1994] решения определили сдвиговый механизм. Но при хорошем совпадении положения нодальных плоскостей азимуты соответствующих осей напряжений отличаются почти на 90° , что заставляет предположить ошибку у одного из указанных авторов. Для землетрясения 14.03.1967 г., также произошедшего в пределах желоба Франц-Виктория, по трем определениям [Мишарина, 1967; Ассиновская, 1994; Аветисов, 1996] совпадение результатов достаточно удовлетворительное. Получен сдвиговый или сбросово-сдвиговый механизм с широтно ориентированной осью растяжения.

Большинство очагов современных землетрясений в пределах арх. Новая Земля, зарегистрированных после прекращения функционирования ядерного полигона, располагаются в пределах о. Северный, преимущественно в южной его части и вдоль западного побережья, и могут быть приурочены к субмеридиональным разломам (см. рис. 4). Непосредственно на территории о. Южный, в области пересечения субмеридиональных и субширотных разломов, находился лишь эпицентр землетрясения 01.08.1986 г. Эта область перехода от низгорья к прибрежно-морской равнине четко выражена в рельефе ступенью амплитудой до 700 м

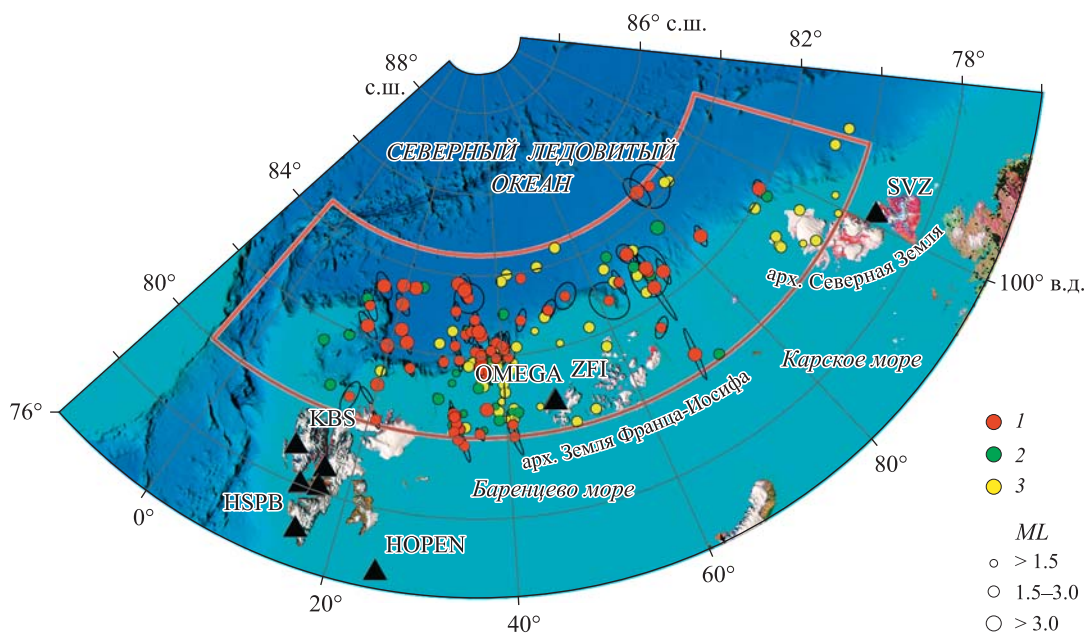


Рис. 5. Распределение эпицентров землетрясений в пределах зоны перехода «континент–океан» за период с декабря 2011 г. по ноябрь 2020 г.

1–3 – эпицентры землетрясений, зарегистрированные: 1 – тремя и более станциями; 2 – двумя станциями; 3 – одной станцией

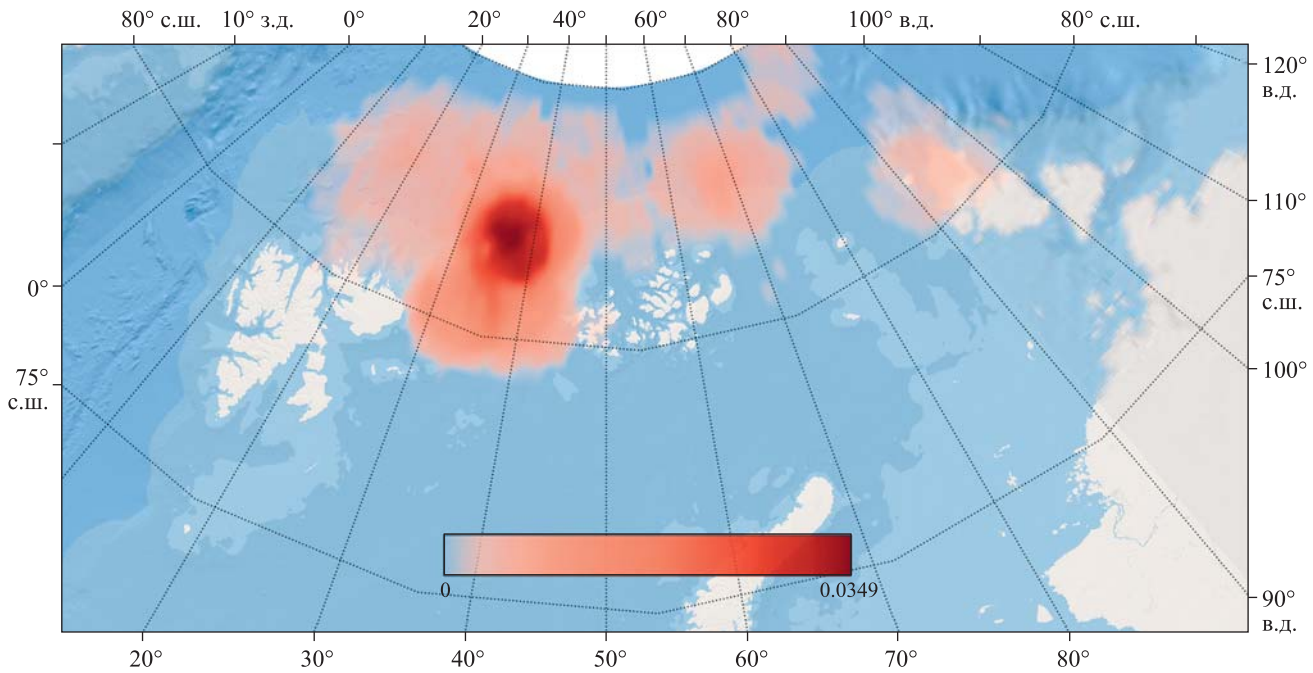


Рис. 6. Карта значений сейсмической активности $A_{3,3}$ для зоны перехода «континент–океан» исследуемого региона, вычисленная с помощью программы «Seisactivity» [Алешин, Морозов, 2022]

[Аветисов, 1996]. Часть эпицентров располагается в акваториях Баренцева и Карского морей и приурочена к различным тектоническим структурам.

Единственным инструментально зарегистрированным в первой половине XX в. в пределах арх. Северная Земля событием является землетрясение 19.10.1924 г. магнитудой $M_S = 5.6$ [Морозов и др., 2022] (см. рис. 4). 07.08.1978 г. с разницей в 40 мин на территории архипелага было зарегистрировано два сильных землетрясения магнитудами mb_{ISC} равными 4.6 и 4.3, которые, вероятнее всего, являются основным толчком и афтершоком.

После установки в 2016 г. на архипелаге стационарной сейсмической станции было зарегистрировано 50 землетрясений (на момент 2020 г.). Пять из них зарегистрированы станциями мировой сети; два – только ближайшими станциями на архипелагах Северная Земля, Земля Франца-Иосифа и Северная Земля, остальные 43 – только одной станцией на арх. Северная Земля.

Эпицентры землетрясений, зарегистрированных несколькими станциями приурочены к континентальному склону, п-ову Таймыр и шельфу Карского моря (рис. 7). Большая часть эпицентров землетрясений, зарегистрированных одной станцией, находится в южной части о. Октябрьской Революции. В этой части острова располагаются крупные ледники, поэтому вполне вероятно, что сейсмичность вызвана их деструкцией.

В табл. 1 представлено распределение количества зарегистрированных в западном секторе Российской Арктики событий по годам и унифицированной магнитуде mb_{ISC} (по [Морозов и др., 2022]). Проведена аналитическая оценка значений представительной магнитуды каталога за разные периоды времени по аналогии с работами [Лутиков и др., 2008, 2009]. Оценка значений представительных магнитуд основывалась как на

особенностях распределения количества зарегистрированных землетрясений, так и частично на работах [Wetmiller, Forsyth, 1978; Ассиновская, 1994; Аветисов, 1996], в которых проводился анализ представительной магнитуды для разных регионов Арктики за разные периоды времени. Значения представительных магнитуд необходимы в дальнейшем для оценки угла графика повторяемости землетрясений.

В частности, в известной работе Б. Гутенберга и К. Рихтера [Gutenberg, Richter, 1954] предполагается, что все землетрясения с $M = 7.0$, которые происходили на Земле с начала XX в., были зарегистрированы без пропусков. Р.Дж. Ветмиллер и Р.Б. Форсайт [Wetmiller, Forsyth, 1978] пришли к выводу, что это утверждение применимо и к Арктике. Г.П. Аветисов [1996] оценивает значения представительной магнитуды в этот период как 5.5–6.0. В работе [Morozov et al., 2019b] отмечается, что в 1904–1911 гг. станции мировой сети регистрировали землетрясения в Арктике с минимальной магнитудой не ниже $M = 6.0$, а уже с 1911 г. – с $M = 5.0$. При этом вплоть до 1950-х годов стационарные сейсмические станции севернее Полярного круга в Арктике не функционировали, за исключением сейсмической станции «Scoresbysund» (код SCO) на о. Гренландия, установленной в 1928 г. В основном развитие инструментальных наблюдений происходило в сейсмоактивных регионах мира.

Вследствие своей удаленности сейсмические станции мировой сети регистрировали только достаточно сильные землетрясения в Арктике, однако постепенно магнитудный порог снижался за счет повышения чувствительности аппаратуры сейсмических станций и их количества. Для периода 1920–1950 гг. за основу авторами принята оценка представительной магнитуды равная 6.0 (см. [Аветисов, 1996]).

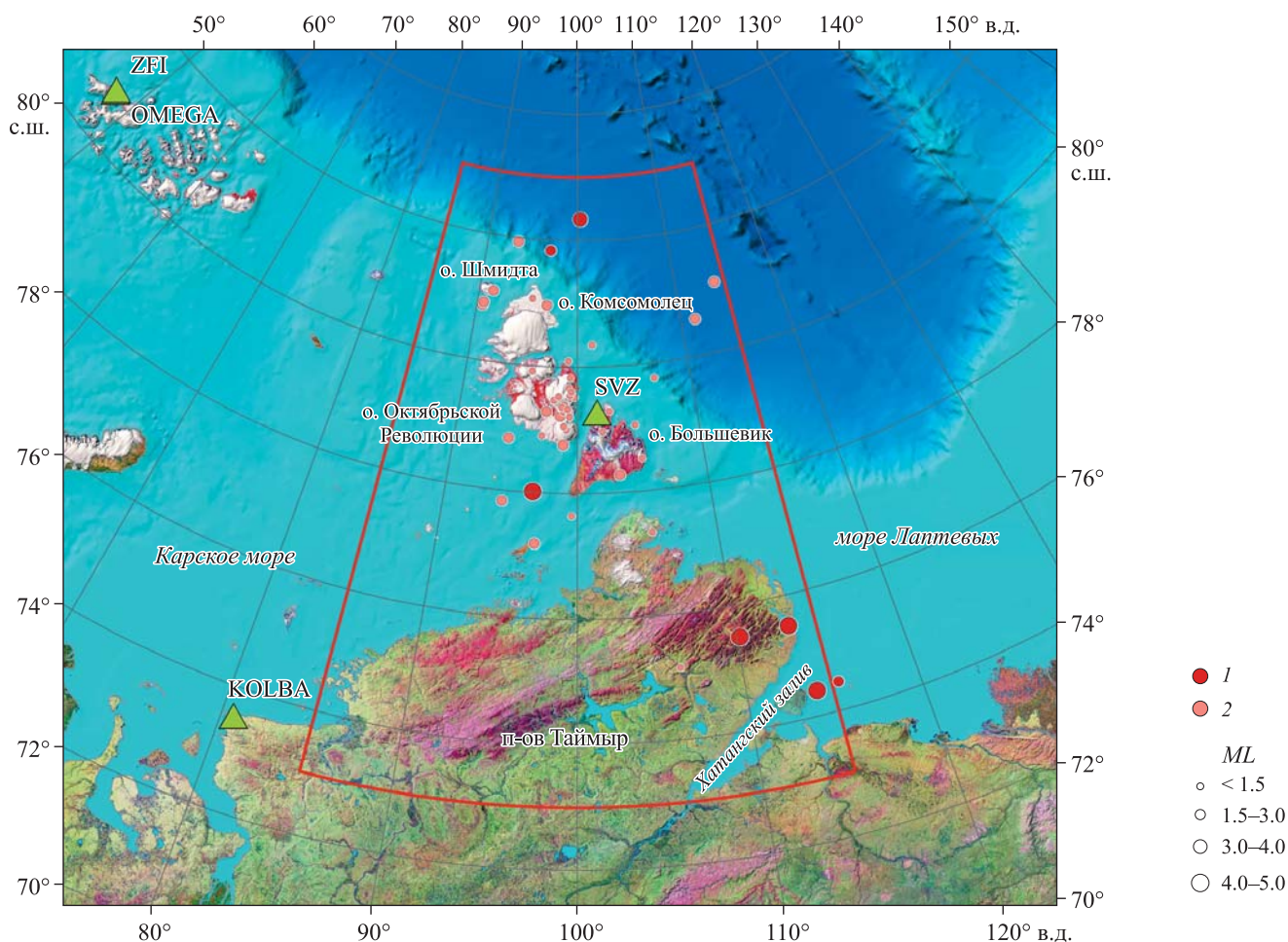


Рис. 7. Распределение эпицентров землетрясений, зарегистрированных в пределах арх. Северная Земля в 2016–2020 гг. несколькими станциями (1) и одной станцией (2)

Таблица 1. Распределение количества землетрясений, зарегистрированных в западном секторе Российской Арктики с 1920 по 2022 г., по годам и унифицированной магнитуде m_{bISC}

| Период, годы | Магнитуда | | | | | | | | | | | | N_0 |
|--------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5 | |
| 1920–1950 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 2 | 0 | 5 |
| 1951–1960 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1961–1970 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 1971–1980 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 1981–1990 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| 1991–2000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 |
| 2001–2011 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 |
| 2012–2020 | 14 | 15 | 10 | 11 | 12 | 12 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 75 |
| N_0 | 14 | 15 | 10 | 14 | 15 | 20 | 13 | 9 | 3 | 1 | 2 | 0 | 117 |
| $N_{отер}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 16 | 12 | 9 | 1 | 1 | 2 | 0 | 54 |

Примечание. Залيفкой выделены представительные магнитуды – значения магнитуд, регистрируемых без пропусков.

Таблица 2. Распределение количества землетрясений, зарегистрированных в западном секторе Российской Арктики с 1990 по 2020 г., по интервалам представительных наблюдений и магнитуд

| Магнитуда | Период, годы | T, лет | N | N/T | lg(N/T) |
|-----------|--------------|--------|----|-------|---------|
| 3.0 | 2012–2020 | 9 | 12 | 1.333 | 0.125 |
| 3.5 | 2001–2020 | 20 | 16 | 0.800 | –0.097 |
| 4.0 | 1981–2020 | 40 | 12 | 0.300 | –0.523 |
| 4.5 | 1961–2020 | 60 | 9 | 0.150 | –0.824 |
| 6.0 | 1920–2020 | 100 | 2 | 0.020 | –1.699 |

В 1950-х годах количество сейсмических станций севернее Полярного круга увеличилось. Прежде всего, этому способствовала подготовка и проведение Международного геофизического года (1957–1958 гг.) [Odishaw, 1959; Stoneley, 1960]. На арх. Шпицберген начала функционировать новая стационарная станция «Isfjord» (1958 г.). На севере Норвегии и Швеции были открыты станции «Tromso» (1960 г.) и «Kiruna» (1951 г.), в Финляндии – «Sodankyla» (1956 г.). В Советском Союзе открылись станции «Апатиты» (1956 г.), «Тикси» (1956 г.) и «Хейс» (1957 г.). Для разных районов Арктики значения представительных магнитуд были различны. В работе [Аветисов, 1996] в качестве среднего значения принимается 4.5–5.0. Авторами в настоящем исследовании для периода 1951–1960 гг. за значение представительной магнитуды принято 5.5.

В 1960-х годах начинается разворачиваться Всемирная сеть сейсмографических станций (World-Wide Network of Seismograph Stations, WWSSN), которая к 1971 г. насчитывала примерно 120 станций с однотипной аппаратурой. В 1964 г. на сессиях Совета по сейсмологии АН СССР была утверждена структура Единой системы сейсмических наблюдений в СССР (ЕССН) и принято положение о независимых от республиканских границ зональных сетях сейсмических станций, объединенных едиными объектами наблюдений и исследований – сейсмоактивными зонами. Одной из сейсмоактивных зон была Арктическая [Старовойт, 2005]. В этот период количество стационарных сейсмических станций севернее Полярного круга значительно увеличилось, в отличие от 1970-х годов, когда в Евразийской Арктике новых станций практически не создавалось. Для периода 1961–1980 гг. за значение представительной магнитуды нами принято 4.5.

В 1980-е годы количество арктических сейсмических станций заметно увеличилось. После разрушительных землетрясений в районе г. Газли в апреле и мае 1976 г. Совет министров СССР в 1977 г. принял специальное постановление относительно усиления научных исследований в области сейсмологии и сейсмостойкого строительства. В нем, в частности, предлагался перевод станций на новую систему финансирования, что крайне положительно сказалось на развитии региональных сетей сейсмических станций. В течение 1980-х годов в СССР было открыто около 200 новых сейсмических

станций [Старовойт, 2005]. Новые станции появились и в Арктическом регионе благодаря усилиям сотрудников Кольского научного центра АН СССР и Опытнометодической сейсмологической партии Якутского филиала Сибирского отделения АН СССР. Количество зарубежных арктических сейсмических станций, включая сейсмическую группу ARCES, также значительно увеличилось [Schweitzer, Roth, 2015]. Поэтому для периода 1981–1990 гг. за представительное значение принята магнитуда 4.0, хотя это и не отражается на количестве зарегистрированных землетрясений.

В 1990–2000 гг., несмотря на экономический кризис в России, закрытие одних сейсмических станций компенсировалось открытием новых и модернизацией действующих. В связи с этим значение представительной магнитуды не увеличилось, что и подтверждается особенностью распределения количества зарегистрированных землетрясений в этот период [Морозов и др., 2022].

За первые два десятилетия XXI в. произошло самое заметное увеличение числа как российских, так и зарубежных сейсмических станций в Евразийской Арктике, что сказалось на уменьшении порога регистрации землетрясений для отдельных районов Арктики. Значение представительной магнитуды за период 2001–2011 гг. принята равной 3.5, а за 2011–2020 гг. – 3.0.

На основе данных табл. 1 была составлена табл. 2 и рассчитан график повторяемости землетрясений для всего исследуемого региона в целом с учетом предположения о единстве геодинамической обстановки. Полученное в интервале магнитуд 3.0–6.0 уравнение ортогональной регрессии с коэффициентом детерминации 0.99 имеет вид:

$$\lg(N/T_{\text{rep}}) = -0.62mb + 2.00.$$

В работе [Ассиновская, 1994] для различных сейсмоактивных тектонических зон Баренцева моря вычислены значения угла наклона, которые варьировались от 0.8 для Мурман-Финмаркенской зоны до 1.27–1.29 – для Свальбардского поднятия и рифтовой зоны. В работе [Аветисов и др., 2002] значения углов наклона определены для сейсмоактивных районов арх. Шпицберген – 1.22 и хр. Книповича – 1.25. Район западного сектора Российской Арктики в пределах рассматриваемых нами границ является в целом слабоактивным, что

и отражено в полученном невысоком значении угла наклона – 0.62.

Вычисленное значение для западного сектора Российской Арктики является первым опытом подобных оценок, так как ранее для этого района оценки не проводились из-за отсутствия достаточного количества данных. Однако это значение нельзя считать вполне надежным не только из-за все-таки малого количества данных, но и из-за начального предположения о стационарности сейсмического режима для всего региона.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ. ВЫВОДЫ

В течение всего XX в. и в начале XXI в. развитие инструментальных наблюдений в Евразийской Арктике, частью которой является западный сектор Арктической зоны Российской Федерации, прошло медленно и неравномерно как во времени, так и в пространстве. Особенности регионального развития инструментальных наблюдений напрямую влияли на сейсмологическую изученность арктических территорий. В Евразийской Арктике объектом исследования в основном становились сейсмоактивные районы, такие как срединно-океанические хребты, арх. Шпицберген, шельф моря Лаптевых, п-ов Таймыр. Большой объем исследований выполнен для западной части Баренцево-Карского региона, которая имела хорошую инструментальную представительность практически в течение всего инструментального периода наблюдений. Центральная и восточная части Баренцево-Карского региона, которые входят в западный сектор Российской Арктики, напротив, всегда имели слабую инструментальную представительность. Поэтому эти районы редко становились объектом исследования сейсмологов, за исключением арх. Новая Земля с функционирующим на нем до 1990 г. ядерным полигоном.

К концу XX в. имелись данные только о сильных землетрясениях в пределах жолоба Франц-Виктория, архипелагов Северная Земля и Новая Земля. Результаты редких экспедиционных исследований указывали на повышенную сейсмичность некоторых районов западного сектора Российской Арктики, которая не могла быть зарегистрирована стационарными сейсмическими станциями в силу их малочисленности и удаленности от очагов.

В начале XXI в. началось самое значительное за весь инструментальный период увеличение сети российских и зарубежных арктических станций, что позволило регистрировать низкомagnitude сейсмичность тех районов, для которых еще недавно это было технически невозможно. Это существенно расширило наши представления о проявлении сейсмичности в пределах западного сектора Российской Арктики. В частности, оказалось, что наибольшая сейсмичность проявляется в пределах зоны перехода «континент–океан» и о. Белый, архипелагов Новая Земля и Северная Земля. Редкая и рассеянная сейсмичность характерна для шельфа Баренцева и Карского морей.

Однако существующей сети сейсмических станций недостаточно для детального изучения отдельных сейсмоактивных зон, в частности для оценки глубин и фокальных механизмов, по причине их малого

количества, неравномерного распределения и большой удаленности друг от друга. Необходимы долгосрочные исследования с помощью донных сейсмометров. Полученные результаты позволят установить пространственно-временные вариации сейсмичности отдельных сейсмоактивных зон и понять ее связь с геолого-тектоническим строением региона и развивающимися в его пределах геодинамическими процессами.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены при финансовой поддержке тем НИР, включенных в государственное задание лабораторий Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Геофизического центра РАН и Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова УрО РАН (№ гос. регистрации 122011300389-8).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Аветисов Г.П.* Сейсмическое районирование территории архипелага Земля Франца-Иосифа // Геофизические методы разведки в Арктике. 1971. № 6. С. 128.
- Аветисов Г.П.* Сейсмоактивные зоны Арктики. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1996. 186 с.
- Аветисов Г.П., Зинченко А.Г., Мусатов Е.Е., Пискарев А.Л.* Сейсмическое районирование Арктического региона // Российская Арктика: Геологическая история, минерагения, геоэкология. СПб.: Изд-во ВНИИОГ, 2002. С. 162–175.
- Адушкин В.В., Стивак А.А.* Подземные взрывы. М.: Наука, 2007. 579 с.
- Алешин И.М., Морозов А.Н.* Программа расчета пространственного распределения региональной сейсмической активности: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663077 от 11 июля 2022 г.
- Антоновская Г.Н., Конечная Я.В., Ваганова Н.В., Басакина И.М., Морозов А.Н., Шахова Е.В., Михайлова Я.А., Данилов К.Б.* Вклад уникальной научной установки «Архангельская сейсмическая сеть» в изучение сейсмичности Российской Арктики // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № 2. С. 1–8. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0587>
- Асминг В.Э.* Создание программного комплекса для автоматизации детектирования, локации и интерпретации сейсмических событий и его использование для изучения сейсмичности Северо-Западного региона: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИДГ РАН, 2004. 126 с.
- Асминг В.Э., Гурьева С.Н., Кузьмин И.А., Кременецкая Е.О., Коломиец А.С., Нахшина Л.П., ..., Федоренко Ю.В.* Сейсмологические исследования на территории Европейского Севера России и прилегающих районов Арктики // Основные результаты научно-исследовательских работ в 1992–1996 гг. / Под ред. И.А. Кузьмина. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1996. 44 с.
- Асминг В.Э., Федоров А.В., Прокудина А.В.* Программа для интерактивной обработки сейсмических и инфразвуко-

- вых записей LOS // Рос. сейсмол. журн. 2021. Т. 3, № 1. С. 27–40. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.02>
- Ассиновская Б.А. Сейсмичность Баренцева моря. М.: НГК РАН, 1994. 128 с.
- Атлас землетрясений в СССР / Отв. ред. Е.Ф. Саваренский, С.Л. Соловьёв, Д.А. Харин. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 338 с.
- Атлас: Геология и полезные ископаемые шельфов России. М.: Науч. мир, 2004. 108 с.
- Баранов С.В., Виноградов А.Н., Николаева С.Б., Петров С.И. Сейсмичность Кольского полуострова по инструментальным данным // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы VI междунар. сейсмол. школы, г. Апатиты, 15–19 августа 2011 г. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 47–51.
- Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А., Кременецкая Е.О., Петров С.И. Формирование системы сейсмологического и инфразвукового мониторинга в Западной Арктике в XX веке и перспективы ее дальнейшего развития // Вестн. Кол. науч. центра РАН. 2012. № 4. С. 140–156.
- Виноградов Ю.А., Кременецкая Е.О. Об уточнении линейно-доменной модели Кандалакшской сейсмогенной зоны на основе современных данных // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XI междунар. сейсмол. школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. С. 93–97.
- Гайсслер В.Х., Баранов Б.В., Шибяев С.В., Хаберланд К., Цуканов Н.В., Дозорова К.А. Российско-германский проект «Сейсмичность и неотектоника Лаптевоморского региона» // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2018. № 1. С. 102–106.
- Завьялов А.Д., Перетокин С.А. Сейсмическая опасность Арктического региона: Состояние и проблемы // Тез. Всерос. науч.-практ. конф. «Инженерная сейсмогеология и сейсмология 2022», г. Москва, 23–25 марта 2022 г. М., 2022. С. 17–20.
- Кременецкая Е.О., Кузьмин И.А., Асминг В.Э., Баранов С.В., Журков М.А. Создание базы данных о сейсмичности Баренц региона // Теоретические и прикладные модели информатизации региона. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2000. С. 44–49.
- Крылов А.А., Иващенко А.И., Ковачев С.А., Цуканов Н.В., Куликов М.Е., Медведев И.П., Ильинский Д.А., Шахова Н.Е. Сеймотектоника и сейсмичность Лаптевоморского региона: Состояние вопроса и первый опыт годичной постановки донных сейсмостанций на шельфе // Вулканология и сейсмология. 2020. № 6. С. 33–49.
- Лазарева А.П. О глубинах арктических землетрясений // Сейсмологические исследования. 1963. № 5. С. 27–30.
- Лазарева А.П. Сейсмические наблюдения в полярных областях: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1977. 26 с.
- Линден Н.А. О карте сейсмичности Арктики // Сейсмические и гляциологические исследования в период МГГ. М.: Изд-во АН СССР, 1959. № 2. С. 7–17.
- Линден Н.А. Изучение сейсмичности Арктики // Сейсмические и гляциологические исследования в период МГГ. М.: Изд-во АН СССР, 1963. № 5. С. 17–26.
- Лукин Ю.Ф. Концептуальные подходы к определению внутренних границ и развитию Российской Арктики в изменяющемся мире // Арктика и Север. 2012. № 6. С. 1–16.
- Лутиков А.И., Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н. Методика оценки сейсмической опасности на стадии уточнения исходной сейсмичности // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы III междунар. сейсмол. школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2008. С. 81–86.
- Лутиков А.И., Рогожин Е.А., Овсяченко Г.Ю., Донцова Г.Ю. Уточнение исходной сейсмичности территорий в условиях их слабой сейсмической изученности // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы IV междунар. сейсмол. школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2009. С. 99–106.
- Мишарина Л.А. Напряжения в земной коре в рифтовых зонах. М.: Наука, 1967. 133 с.
- Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Михайлова А.Я., Старков И.В. Унификация магнитуд современных землетрясений Евразийской Арктики // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58, № 1. С. 67–80.
- Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Перетокин С.А., Алешин И.М. Сейсмичность западного сектора Российской Арктики // Физика Земли. 2023. № 2. С. 115–148.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. 536 с.
- Панасенко Г.Д. Проблемы сейсмического районирования западного сектора Советской Арктики // Природа и хозяйство Севера. 1986. № 14. С. 4–6.
- Рогожин Е.А., Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Федоренко И.В. Об особенностях сейсмичности Евро-Арктического региона // Докл. Акад. наук. 2016. Т. 467, № 5. С. 585–588.
- Сейсмическая сотрясаемость территории СССР / Отв. ред. Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1979. 192 с.
- Старовойт О.Е. Инструментальные сейсмические наблюдения в России // Вестн. Владикавказ. ИЦ РАН. 2005. Т. 5, № 1. С. 8–12.
- Antonovskaya G., Konechnaya Y., Kremenetskaya E.O., Asming V., Kværna T., Schweitzer J., Ringdal F. Enhanced earthquake monitoring in the European Arctic // Polar Sci. 2015. V. 9, N 1. P. 158–167.
- Antonovskaya G., Morozov A., Vaganova N., Konechnaya Y. Seismic monitoring of the European Arctic and adjoining regions // The Arctic: Current issues and challenges / Ed. by O.S. Pokrovsky, S.N. Kirpotin, A.I. Malov. N.Y.: Nova Sci. Publ., 2020. P. 303–368.
- Bowers D. Was the 16 August 1997 seismic disturbance near Novaya Zemlya an earthquake? // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2002. V. 92, N 6. P. 2400–2409.
- Bowers D., Trodd H., Douglas A. The Novaya Zemlya seismic disturbance of 16 August 1997 // AWE. 1998. Rep. O-1/97.
- Fedorov A.V., Asming V.E., Jevtjugina Z.A., Prokudina A.V. Automated seismic monitoring system for the European Arctic // Seism. Instrum. 2019. V. 55, N 1. P. 17–23.
- Gibbons S.J., Antonovskaya G., Asming V., Konechnaya Y.V., Kremenetskaya E., Kværna T., ..., Vaganova N.V. The 11 October 2010 Novaya Zemlya earthquake: Implications

- for velocity models and regional event location // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2016. V. 106, N 4. P. 1470–1481.
- Gutenberg B., Richter C. *Seismicity of the Earth*. N.Y.: Geol. Soc. of Amer., 1941. 140 p. (Spec. pap. V. 34).
- Gutenberg B., Richter C. *Seismicity of the Earth and associated phenomena*. 2nd ed. Princeton; New Jersey: Princeton Univ. Press, 1954. 310 p.
- Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Kedrov E.O., Skorkina A.A., Nikitina I.M. Strong earthquake-prone areas in the eastern sector of the Arctic zone of the Russian Federation // *Appl. Sci.* 2022a. V. 12, N 23. P. 11990. <https://doi.org/10.3390/app122311990>
- Gvishiani A.D., Vorobieva I.A., Shebalin P.N., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Skorkina A.A. Integrated earthquake catalog of the eastern sector of the Russian Arctic // *Appl. Sci.* 2022b. V. 12, N 10. P. 5010. <https://doi.org/10.3390/app12105010>
- Hartse H.E. The 16 August 1997 Novaya Zemlya seismic event as viewed from GSN stations KEV and KBS // *Seismol. Res. Let.* May, 1998. V. 69 (3). <https://doi.org/10.2172/650322>
- Hodgson J.H., Bath M., Jensen H., Kvale A., Linden N.A., Murphy L.M., Shebalin N.V., Tryggvason E., Vesanen E. Seismicity of the Arctic // *Ann. Intern. Geophys. Year. Seismol.* 1965. V. 30. P. 33–45.
- Ivanova N.M., Sakoulina T.S., Roslov Y.V. Deep seismic investigation across the Barents–Kara region and Novozemelskiy fold belt (Arctic shelf) // *Tectonophysics.* 2006. V. 420, N 1–2. P. 123–140.
- Khalturin V.I., Rautian T.G., Richards P.G., Leith W.S. A review of nuclear testing by the Soviet Union at Novaya Zemlya, 1955–1990 // *The technical basis for arms control, disarmament, and nonproliferation initiatives*. 2005. V. 13, is. 1–2. P. 1–42. <https://doi.org/10.1080/08929880590961862>
- Kremenetskaya E.O., Asming V.E. Seismicity of Kola and related problems // 25th Nordic seminar on detection seismology: Abstr. Stockholm, Sweden, 23–25 August 1994.
- Kristoffersen Y., Husebye E.S., Bungum H., Gregersen S. Seismic investigations of the Nansen ridge during the FRAM I experiment // *Tectonophysics.* 1982. V. 82, N 1–2. P. 57–68.
- Kulhánek O. The status, importance, and use of historical seismograms in Sweden // *Symposium on historical seismograms and earthquakes*, Tokyo, Japan, Aug. 27–28, 1985: Abstr. London: Acad. Press, 1988. P. 64–69.
- Kværna T., Ringdal F., Schweitzer J., Taylor L. Optimized seismic threshold monitoring. Pt. 1. Regional processing // *Pure and Appl. Geophys.* 2002. V. 159, N 5. P. 969–987.
- Kværna T., Dando B.D.E., Gibbons S.J. Seismic monitoring of Novaya Zemlya: Progress, challenges, and prospects // *Seismol. Soc. Amer.* 2023 V. XX. P. 1–14. <https://doi.org/10.1785/0220220338>
- Marshall P.D., Stewart R.C., Lilwall R.C. The seismic disturbance on 1986 August 1 near Novaya Zemlya: A source of concern? // *Geophys. J. Intern.* 1989. V. 98, N 3. P. 565–573.
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Konechnaya Y.V., Asming V.E. New data about seismicity and crustal velocity structure of the «continent–ocean» transition zone of the Barents-Kara region in the Arctic // *J. Seismol.* 2015. V. 19, N 1. P. 219–230. <https://doi.org/10.1007/s10950-014-9462-z>
- Morozov A.N., Asming V.E., Vaganova N.V., Konechnaya Y.V., Mikhaylova Y.A., Evtyugina Z.A. Seismicity of the Novaya Zemlya archipelago: Relocated event catalog from 1974 to 2014 // *J. Seismol.* 2017. V. 21, N 6. P. 1439–1466. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9676-y>
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Konechnaya Y.V. The October 14, 1908 *MW* 6.6 earthquake in the Barents and Kara sea region of the Arctic: Relocation based on instrumental data // *Polar Sci.* 2019a. V. 20. P. 160–166.
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Shakhova E.V., Konechnaya Y.V., Asming V.E., Antonovskaya G.N., Evtyugina Z.A. Seismicity of the Arctic in the early twentieth century: Relocation of the 1904–1920 earthquakes // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2019b. V. 109, N 5. P. 2000–2008. <https://doi.org/https://doi.org/10.1785/0120190018>
- Odishaw H. International geophysical year // *Science.* 1959. V. 129, N 3340. P. 14–25.
- Ringdal F., Kremenetskaya E., Asming V. Observed characteristics of regional seismic phases and implications for *P/S* discrimination in the European Arctic // *Pure Appl. Geophys.* 2002. V. 159. P. 701–719.
- Schindwein V., Müller C., Jokat W. Microseismicity of the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean: A pilot study // *Geophys. J. Intern.* 2007. V. 169, N 1. P. 100–112.
- Schweitzer J., Kennett B.L.N. Comparison of location procedures: The Kara Sea event of 16 August 1997 // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2007. V. 97, N 2. P. 389–400.
- Schweitzer J., Roth M. The NORSAR Data Center (FDSN Network Code NO): Biannual report prepared for the FDSN meeting during IUGG General assembly in Prague. Kjeller, Norway: NORSAR, 2015. 13 p.
- Schweitzer J., Paulsen B., Antonovskaya G.N., Fedorov A.V., Konechnaya Y.V., Asming V.E., Pirli M. A 24-yr-long seismic bulletin for the European Arctic // *Seismol. Res. Let.* 2021. V. 92, N 5. P. 2758–2767.
- Stoneley R. The international geophysical year // *Nature.* 1960. V. 188, N 4750. P. 529–532.
- Storchak D.A., Di Giacomo D., Engdahl E.R., Harris J., Bondár I., Lee W.H., ..., Villaseñor A. The ISC–GEM global instrumental earthquake catalogue (1900–2009): Introduction // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2015. V. 239. P. 48–63.
- Tams E. Die seismischen Verhältnisse des europäischen Nordmeer, zentralblatt für mineralogie, geologie und palaentologie, Jahrg // *Number.* 1922. V. 13. P. 385–397.
- Vorobieva I.A., Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Barykina Y.V., Antipova A.O. Nearest neighbor method for discriminating aftershocks and duplicates when merging earthquake catalogs // *Front. in Earth Sci.* 2022. V. 10. P. 1–12. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.820277>
- Wetmiller R.J., Forsyth D.A. Seismicity of the Arctic, 1908–1975 // *Arctic Geoph. Rev.* / Ed. J.F. Sweeney. 1978. V. 45, N 4. P. 15–24.

Сведения об авторах

МОРОЗОВ Алексей Николаевич – кандидат технических наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: morozovalexey@yandex.ru

ВАГАНОВА Наталья Владиславовна – кандидат геолого-минералогических наук, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения РАН. Россия, 163020, г. Архангельск, Никольский просп., д. 20. E-mail: nvag@yandex.ru

АЛЕШИН Игорь Михайлович – кандидат физико-математических наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; Геофизический центр РАН. Россия, 119296, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3. E-mail: ima@ifz.ru

SEISMIC STUDY OF THE WESTERN SECTOR OF THE RUSSIAN ARCTIC

© 2023 A.N. Morozov^{1*}, N.V. Vaganova², I.M. Aleshin^{1,3}

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

² Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia

³ Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: morozovalexey@yandex.ru

Abstract. The article analyzes the development of ideas about the seismicity of the western sector of the Russian Arctic, which is directly related to the peculiarities of the development of instrumental observations in the region. The current ideas about the seismicity of the western sector of the Russian Arctic are generalized. Throughout the 20th century, the development of instrumental observations in the Eurasian Arctic, of which the western sector of the Russian Arctic is a part, has been slow and uneven both in time and space. In the Eurasian Arctic, seismically active regions, such as mid-ocean ridges, the Spitsbergen archipelago, the Laptev Sea shelf, and the Taimyr Peninsula, became the object of study. On the contrary, the central and eastern parts of the Barents-Kara region, which are part of the western sector of the Russian Arctic, have always had poor instrumental representation and, accordingly, poor seismic knowledge. The intensive development of instrumental observations in the Eurasian Arctic in the 21st century has made it possible to significantly expand our understanding of the seismicity of the western sector of the Russian Arctic. The greatest seismicity is manifested within the transition zone «continent–ocean» and Kvitoya (Bely) island, Novaya Zemlya and Severnaya Zemlya archipelagos. The shelf of the Barents and Kara Seas itself is characterized by rare and scattered seismicity. However, the existing network of seismic stations is insufficient for detailed studies of spatio-temporal variations in seismicity of individual seismically active zones and for a more correct understanding of its relationship with the geological structure of the region and the geodynamic processes developing within it. Long-term studies with bottom seismometers are needed.

Keywords: western sector of the Russian Arctic, earthquake catalog, seismic hazard, seismicity in the Arctic.

About the authors

MOROZOV Alexey Nikolaevich – Cand. Sci. (Tech.), Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st., 10-1. E-mail: morozovalexey@yandex.ru

VAGANOVA Natalya Vladislavovna – Cand. Sci. (Geol. and Min.), Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Russia, 163020, Arkhangelsk, Nikolsky av., 20. E-mail: nvag@yandex.ru

ALESHIN Igor Mihailovich – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st., 10-1; Geophysical Center, Russian Academy of Sciences. Russia, 119296, Moscow, Molodezhnaya st., 3. E-mail: ima@ifz.ru

Cite this article as: Morozov A.N., Vaganova N.V., Aleshin I.M. Seismic study of the western sector of the Russian Arctic, *Geofizicheskie processy i biosfera* (Geophysical Processes and Biosphere), 2023, vol. 22, no. 4, pp. 67–80 (in Russian). <https://doi.org/10.21455/GPB2023.4-7>

English version: *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, vol. 59, iss. 12. ISSN: 0001-4338 (Print), 1555-628X (Online). <https://link.springer.com/journal/volumesAndIssues/11485>