

АРХАНГЕЛЬСКАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ СЕТЬ: РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АРКТИКИ ЗА 2020—2024 ГОДЫ

Г. Н. Антоновская¹, Я. В. Конечная^{1,2}, Н. В. Ваганова¹, Е. Р. Морозова¹, Я. М. Михайлова¹

¹ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (Архангельск, Российская Федерация)

² Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (Обнинск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 25 марта 2025г.

Для цитирования

Антоновская Г. Н., Конечная Я. В., Ваганова Н. В. и др. Архангельская сейсмическая сеть: результаты сейсмического мониторинга Арктики за 2020—2024 годы // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 3. — С. 137—148. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-137-148.

Рассмотрены возможности Архангельской сейсмической сети в вопросах исследования Арктики. Приводятся краткие результаты таких направлений исследований, как сейсмический мониторинг, криосейсмология, деформационные волны. Также рассмотрены технические вопросы, касающиеся очистки сейсмических каталогов от событий техногенной природы и ледотрясений. За последние пять лет с помощью станций Архангельской сети определены эпицентры 2500 землетрясений, в том числе из районов архипелага Новая Земля и шельфовых территорий Карского моря. Представительный уровень магнитуды составляет 3,0. Впервые на ледниках Земли Франца-Иосифа зарегистрированы сейсмические события, позволяющие начать мониторинг ледниковой активности отдельных островов архипелага.

Ключевые слова: Арктика, сейсмические исследования, землетрясение, мониторинг, Северный морской путь, Архангельская сейсмическая сеть.

Введение

Северный морской путь — важная часть инфраструктуры экономического комплекса Крайнего Севера и связующее звено между российским Дальним Востоком и западными районами страны. В связи с расширением деятельности по разведке и добыче ресурсов на арктическом континентальном шельфе важнейшим элементом является минимизация воздействия процессов естественного и искусственного происхождения на инфраструктуру и важные инженерно-технические объекты.

Промышленная деятельность в Арктике влечет за собой риски, связанные с техногенным воздействием и экологическими факторами. Некоторые ключевые промышленные объекты и разрабатываемые месторождения в западном секторе российской Арктики (севернее Северного полярного круга) показаны на рис. 1.

На сегодняшний день трасса Северного морского пути (СМП) крайне неравномерно охвачена инструментальными сейсмологическими наблюдениями из-за суровых климатических и неблагоприятных географических условий, а также дороговизны экспедиционных работ. С 2011 г. благодаря усилиям сотрудников Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (ФИЦКИА УрО РАН) стали развиваться инструментальные наблюдения на побережье Карского моря [1] и арктических российских архипелагах Земля Франца-Иосифа [2], Северная Земля [3] и Новая Земля [4].

Кольский и Якутский филиалы Единой геофизической службы РАН (ЕГС РАН) установили новые станции на севере Кольского полуострова, на полуострове Ямал и на севере Якутии. В 2023 г. ЕГС РАН установила станцию на архипелаге Земля Франца-Иосифа (<http://eqru.gsras.ru/stations/index.php?inc=netlist>). Одновременно на западе европейской Арктики по-

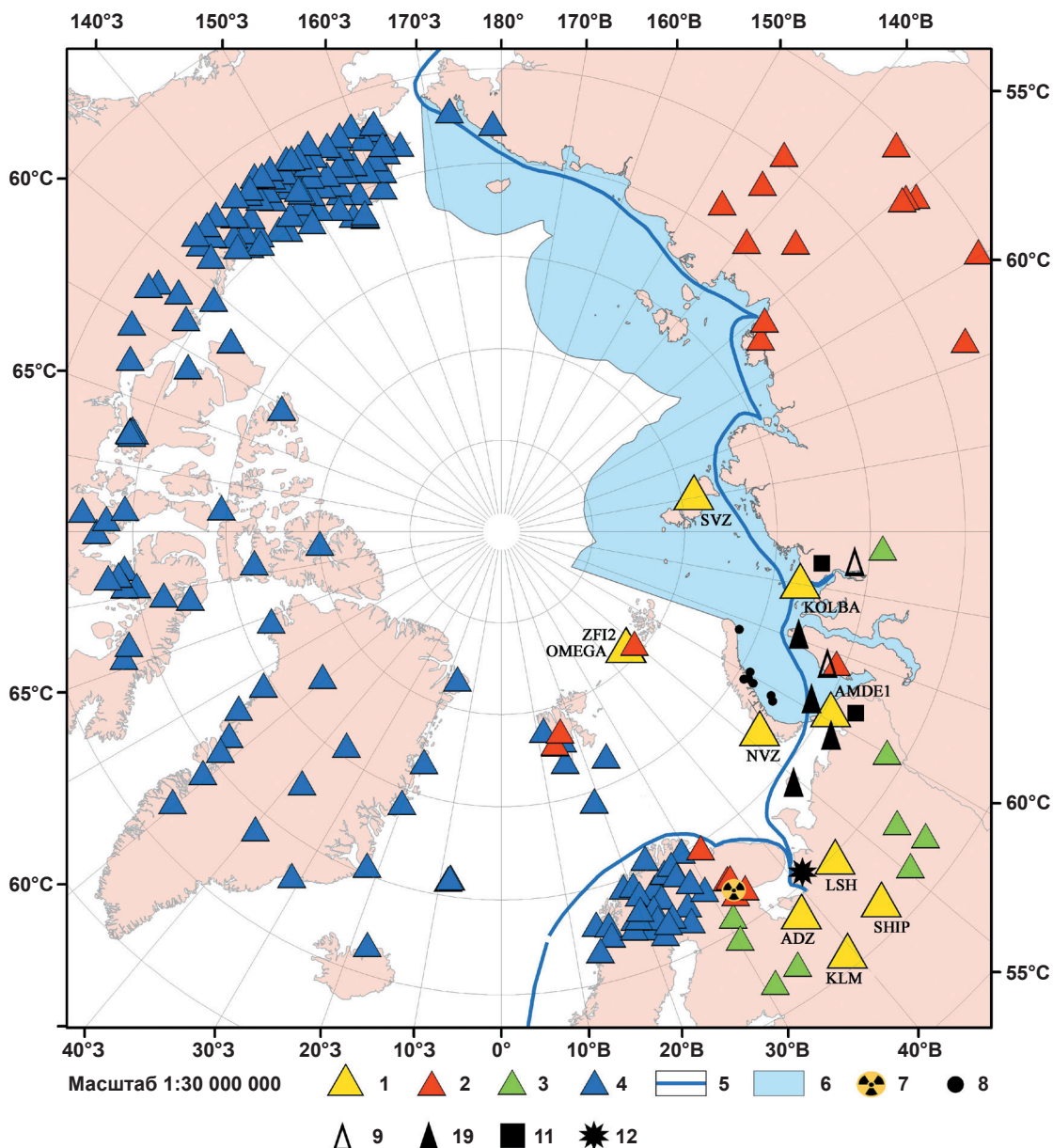


Рис. 1. Современное расположение сейсмических станций и промышленных объектов в Арктике: 1 – сейсмические станции Архангельской сейсмической сети ФИЦКИА УрО РАН, 2 – сейсмические станции ЕГС РАН, 3 – другие станции российских локальных сейсмических сетей, 4 – зарубежные сейсмические станции, 5 – трасса Северного морского пути, 6 – акватория Северного морского пути (<https://nsr.rosatom.ru/ofitsialnaya-informatsiya/granitsy-akvatorii-severnogo-morskogo-puti/>), 7 – Кольская АЭС, 8 – захоронения твердых радиоактивных отходов, 9 – газовые месторождения, 10 – нефтяные месторождения, 11 – угольные месторождения, 12 – алмазы

Fig. 1. Current location of seismic stations and industrial facilities in the Arctic: 1 – seismic stations of the FECIAR UrO RAS Arkhangelsk seismic network, 2 – the GS RAS seismic stations, 3 – other stations of Russian local seismic networks, 4 – foreign seismic stations, 5 – the Northern Sea Route, 6 – the water area of the Northern Sea Route (<https://nsr.rosatom.ru/ofitsialnaya-informatsiya/granitsy-akvatorii-severnogo-morskogo-puti/>), 7 – Kola NPP, 8 – solid radioactive waste disposal sites, 9 – gas fields, 10 – oil fields, 11 – coal fields, 12 – diamonds

являлись новые станции у Норвежской национальной сейсмической сети, агентства NORSAR (<https://www.norsar.no/projects/norwegian-national-seismic-network/>), на архипелаге Шпицберген была установлена сейсмическая станция Польской академии наук, что способствовало расширению представлений о сейсмичности этого региона. Таким образом, к настоящему времени можно считать, что в европейской

Арктике функционирует относительно плотная, хоть и неравномерная сеть стационарных сейсмических станций (см. рис. 1). Параметры станций Архангельской сейсмической сети приведены в табл. 1.

Архангельская сейсмическая сеть ФИЦКИА УрО РАН, имеющая статус уникальной научной установки (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/310187/>), позволяет проводить исследования сразу по нескольким на-

Таблица 1. Параметры стационарных станций Архангельской сейсмической сети ФИЦКИА УрО РАН
Table 1. Parameters of permanent stations of the Arkhangelsk seismic network of the FECIAR UrB RAS
(Laverov Federal Research Center for Comprehensive Study of the Arctic of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences)

Код станции	Название станции	Широта, °N	Долгота, °E	Высота над уровнем моря, м	Дата открытия	Тип аппаратуры
ADZ	Андозеро	63,92	38,28	51	Ноябрь 2015 г.	CMG-3ESP+Centaur
AMDE1	Амдерма 1	69,72	61,66	40	Октябрь 2019 г.	Trillium Compact 120s+Centaur
KLM	Климовская	60,85	39,51	157	Ноябрь 2003 г.	CMG-3ESPC+Centaur
KOLBA	Колба	73,53	80,70	11	Октябрь 2020 г.	Trillium Compact 120s+Centaur
LSH	Лешуконское	64,87	45,73	60	Октябрь 2006 г.	CMG-3ESP+GSR-24
OMEGA	Омега	80,78	47,73	24	Август 2015 г.	CMG-3T+DM-24
SHIP	Среднее Шипицыно	61,61	45,90	68	Август 2019 г.	CMG-40T+Centaur
SVZ	Северная Земля	79,27	101,65	22	Ноябрь 2016 г.	CMG-6TD
ZFI2	Земля Франца-Иосифа 2	80,80	47,65	18	Сентябрь 2011 г.	Trillium Compact 120s+Centaur
NVZ	Новая Земля	72,37	52,71	–3	Июль 2022 г.	Trillium Compact 120s+Centaur

правлениям. Во-первых, это сейсмический мониторинг российской Арктики и сопредельных территорий, который обеспечивает понимание сейсмической опасности вдоль СМП и на побережье арктических морей. Несмотря на слаборазвитую инфраструктуру, на приарктических территориях ведется добыча полезных ископаемых, сопровождаемая событиями техногенной природы, регулярно регистрируемыми станциями Архангельской сети. Отсюда вытекает второе направление исследований — мониторинг техногенной сейсмичности и очистка сейсмических каталогов от техногенных событий [5]. В-третьих, это изучение глубинного строения земной коры и верхней мантии [6; 7], которое выполняется путем применения методологии приемных функций [8; 9], и геодинамика платформенных территорий.

Созданный сейсмический каталог позволяет сопоставить результаты с глубинным строением, выявить соответствие распределения сейсмической активности наиболее геодинамически активным структурам и зонам концентрации тектонических напряжений [4]. Отдельные исследования были посвящены оценке влияния срединно-океанических хребтов (COX) на сейсмичность шельфа западного сектора российской Арктики и северной окраины Восточно-Европейской платформы [10]. Волновые деформационные процессы, распространяющиеся в земной коре с различными скоростями, детально рассмотрены в [11—16].

Как известно, изменения климата остро проявляются в полярных регионах, поскольку ледники сильно реагируют на изменения температуры. Таяние арктических льдов меняет метеоусловия, что осложняет навигацию по СМП. Поэтому новые сведения о напряженно-деформированном состоянии ледников и морского льда важны для прогнозирования ледовой обстановки. Сейсмология традиционно изучает землетрясения. Однако сейсмические сигналы генерируются не только в твердой земле, но и в криосфере, их принято называть льдотрясениями [17—20]. Открытие сейсмических станций на арктических островах позволило заложить основы криосейсмологического мониторинга российской Арктики [21; 22].

Цель статьи — обобщение результатов за 2020—2024 гг., полученных на базе Архангельской сейсмической сети ФИЦКИА УрО РАН.

Методы исследований

Сейсмические записи станций Архангельской сети обрабатываются традиционными методами с использованием программного комплекса WSG (<http://www.ceme.gsras.ru/new/soft/WSG/>) разработки ЕГС РАН. Локация землетрясений и внесение сведений в сейсмологический каталог предполагают использование данных не менее трех станций, в том числе привлекаются волновые формы других российских и зарубежных станций, показанных на рис. 1. Посто-

янно ведется работа по повышению точности определения основных параметров арктических землетрясений, что связано с большим числом вовлечения арктических станций в обработку данных, созданием региональных годографов и уточненной шкалы локальной магнитуды. Например, в период становления сейсмического мониторинга Арктики на базе Архангельской сети (2011—2015 гг.) в обработку вовлекались в среднем 3—4 станции, а в последние два года их число выросло до 6—8 (2023—2024 гг.).

Параметры эпицентра землетрясения определяются методом засечек с фиксированной глубиной события. Глубина землетрясений для Арктической зоны определяется лишь в отдельных случаях (например, для архипелага Новая Земля) в связи с небольшим числом станций, участвующих в обработке большинства землетрясений. Такая ситуация сложилась для всей Арктики, она связана с конфигурацией установленных станций, что в итоге не обеспечивает в большинстве случаев должным образом окружение эпицентра сейсмическими станциями.

Кроме комплекса WSG в обработке используются другие разработки ЕГС РАН — программа NAS [23] для локации событий с определением глубины и эллипса ошибок и программа Event Locator (EL) (<http://www.krsc.ru/?q=ru/EL>) для локации событий по данным одной станции.

В сводной обработке землетрясений применяются региональная скоростная модель Barents [24] и шкала локальной магнитуды ML [25], адаптированная для арктического региона.

В основе определения критериев идентификации техногенных событий лежат методы, разработанные в ФИЦКИА УрО РАН [26] и Кольском филиале ЕГС РАН [27]. Набор критериев формируется для каждой станции Архангельской сети индивидуально и включает анализ следующих параметров: локация событий вблизи промышленного объекта, анализ спектрально-временных диаграмм (СВАН-диаграмм), анализ соотношения амплитуд продольных и поперечных волн (далее соответственно Р-волн и S-волн), анализ суточного распределения сейсмических событий и анализ магнитудного диапазона зарегистрированных событий. Как правило, по отдельно взятому критерию невозможно определить природу события, необходимо использовать их совокупность.

Анализ ледниковой сейсмичности требует разработки собственных методов исследования, в первую очередь связанных с тем, что анализируются данные одиночных сейсмических станций, установленных в грунте, а не на ледниковых куполах. Нами разработан подход к определению природы низкомагнитудных локальных событий, регистрируемых станциями на арктических архипелагах, позволяющий разделять сейсмические события по типу — землетрясение или льдотрясение [21; 22]. В настоящее время активно продолжается работа по исследованию возможностей сейсмологии в изучении ледников.

Для исследования возможного влияния СОХ на сейсмичность архипелага Новая Земля был состав-

лен обширный каталог, выходящий за рамки возможностей Архангельской сети. Для его формирования использовался каталог Международного сейсмологического центра (International Seismological Center — <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/>) с 1980 г., предварительно очищенный от ядерных взрывов в районе Новой Земли, дополненный данными Архангельской сейсмической сети и приведенный к единой (унифицированной) магнитуде [4]. Задачу по оценке влияния СОХ на сейсмичность архипелага Новая Земля можно решить аналитически путем применения модели Эльзассера. В. Эльзассер [28] впервые предложил теорию литосферных волноводов напряжений и создал уравнение переноса локальных напряжений в жесткой упругой литосфере, подстилаемой вязкой астеносферой. Эта теория впоследствии использовалась с различными модификациями. Более подробно методика описана в [11—13].

Результаты и их обсуждение

Сейсмический мониторинг. С помощью Архангельской сейсмической сети за 2020—2024 гг. удалось получить данные о 2500 землетрясениях из арктического региона (рис. 2). Построен кумулятивный график повторяемости за пятилетний период, согласно которому представительный уровень магнитуды Архангельской сейсмической сети $M_{L, пред}$ составляет 3,0. Землетрясения трассируются вдоль основных сейсмоактивных структур — срединно-океанических хребтов Гаккеля, Книповича и Мона, а также в районе архипелага Шпицберген. На хребте Гаккеля регулярно регистрируются сильные землетрясения, сопровождаемые афтершоками, выявлена роевая сейсмичность [29].

Наиболее ценную информацию каталог Архангельской сети содержит о слабой сейсмичности шельфовых окраин Баренцево-Карского региона (эпицентры лоцируются в устьевых частях желобов Франц-Виктории и Св. Анны), архипелагов Новая Земля, Земля Франца-Иосифа и Северная Земля. В акватории Северного морского пути сейсмичность отмечается в восточной части хребта Гаккеля, выявлена она в Карском море, на побережье моря Лаптевых (полуостров Таймыр и Северо-Сибирская низменность).

Так, в районе архипелага Новая Земля за последние пять лет станциями Архангельской сейсмической сети было зарегистрировано 16 землетрясений, в том числе 7 только по данным станции «Новая Земля».

Установка сейсмических станций на арктических островах позволила лоцировать сейсмические события в акватории Карского моря. Например, за последние три года Архангельской сетью зарегистрированы два слабых сейсмических события естественного происхождения. Они также были зафиксированы норвежской сейсмологической компанией NORSAR, чьи волновые формы привлекались к совместной обработке данных Архангельской сети для расчетов основных параметров, представленных в табл. 2.

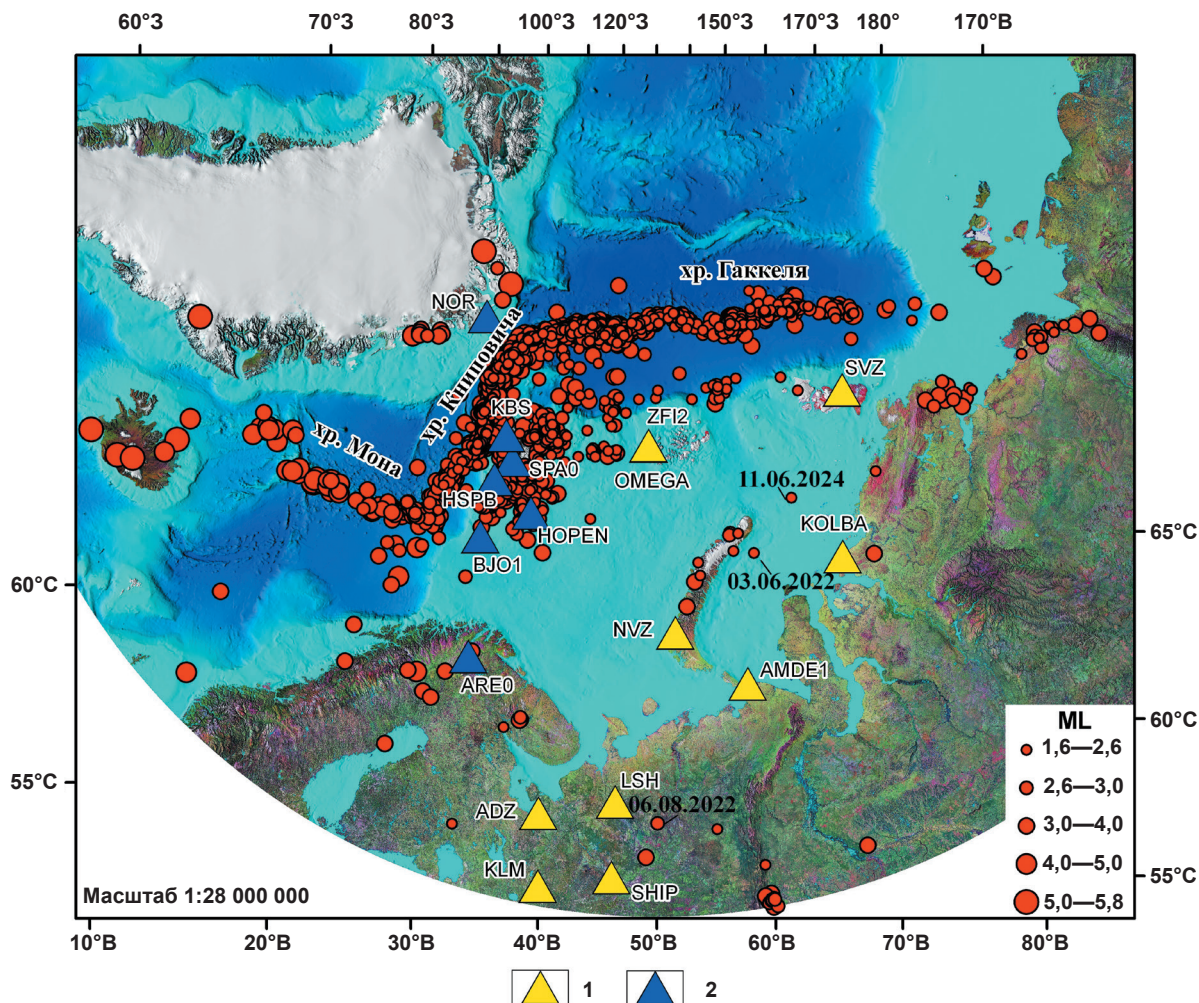


Рис. 2. Пространственное распределение эпицентров землетрясений в Арктике по результатам сейсмического мониторинга Архангельской сейсмической сети с привлечением исходных данных других сейсмологических сетей за 2020–2024 гг.: 1 – сейсмические станции Архангельской сейсмической сети, 2 – зарубежные сейсмические станции
 Fig. 2. Earthquakes in the Arctic according to seismic monitoring data of the Arkhangelsk Seismic Network using the initial data of other seismological networks for 2020–2024: 1 – seismic station of the Arkhangelsk seismic network, 2 – foreign seismic stations

Событие 03.06.2022, $t_0 = 22:47:36.2$: зарегистрировано редкое землетрясение в Карском море (см. рис. 2) на восточной границе Новоземельской впадины (рис. 3). Эпицентр приурочен к разрывному нарушению вблизи тройного сочленения структур разных знаков — Восточно-Новоземельского грабена, впадины Благополучия и вала Литке. Второе событие произошло спустя год, эпицентр приурочен к центральной части Карского моря (см. рис. 3). Его особенность — гипоцентр определен на глубине 60 км, при этом эпицентр попадает на Центрально-Карское поднятие.

Произошедшие в Карском море землетрясения свидетельствуют, что представления о напряженно-деформированном состоянии региона неполны, а сам факт проявления сейсмичности в районах размещения опасных объектов повышает риск их повреждения, что может привести к экологической катастрофе.

Существенной проблемой является то, что около 60% регистрируемых арктических землетрясений не

вносятся в сейсмический каталог в силу регистрации их одиночными сейсмическими станциями (напомним, в каталог включаются только землетрясения, зарегистрированные минимум тремя станциями). Заданный вектор на развитие арктических территорий требует уточнения карт общего сейсмического районирования для наземных районов и создания таковых для арктических акваторий. В этой связи сведения о слабой сейсмичности становятся особенно актуальными, так как позволяют построить график повторяемости, используемый для оценки максимально возможного землетрясения.

Техногенная сейсмичность. Начиная с 2022 г. станции Архангельской сети ведут регистрацию техногенной сейсмичности из зоны добычи Средне-Тиманского бокситового рудника, расположенного на границе Архангельской области и Республики Коми. В этом же районе за рассматриваемый период зафиксировано событие естественной природы (06.08.2022, $t_0 = 10:21:36.0$, $ML = 3,0$), произошедшее

Таблица 2. Параметры землетрясений в Карском море, произошедших в 2022—2024 гг.

Table 2. Parameters of earthquakes in the Kara Sea recorded in 2022—2024

Дата, дд.мм.гггг	Время, чч:мм:сс.с	Гипоцентр			Эллипс ошибок			Маг- ниту- да ML	Коли- чество стан- ций
		Широта, °N	Долгота, °E	Глубина, км	AzMajor, град.	Rminor, км	Rmajor, км		
03.06.2022	22:47:36.3	75,28	67,38	15	70	9,37	16,83	2,4	6
11.06.2024	02:04:35.3	76,93	77,84	60	70	12,93	26,92	2,4	5

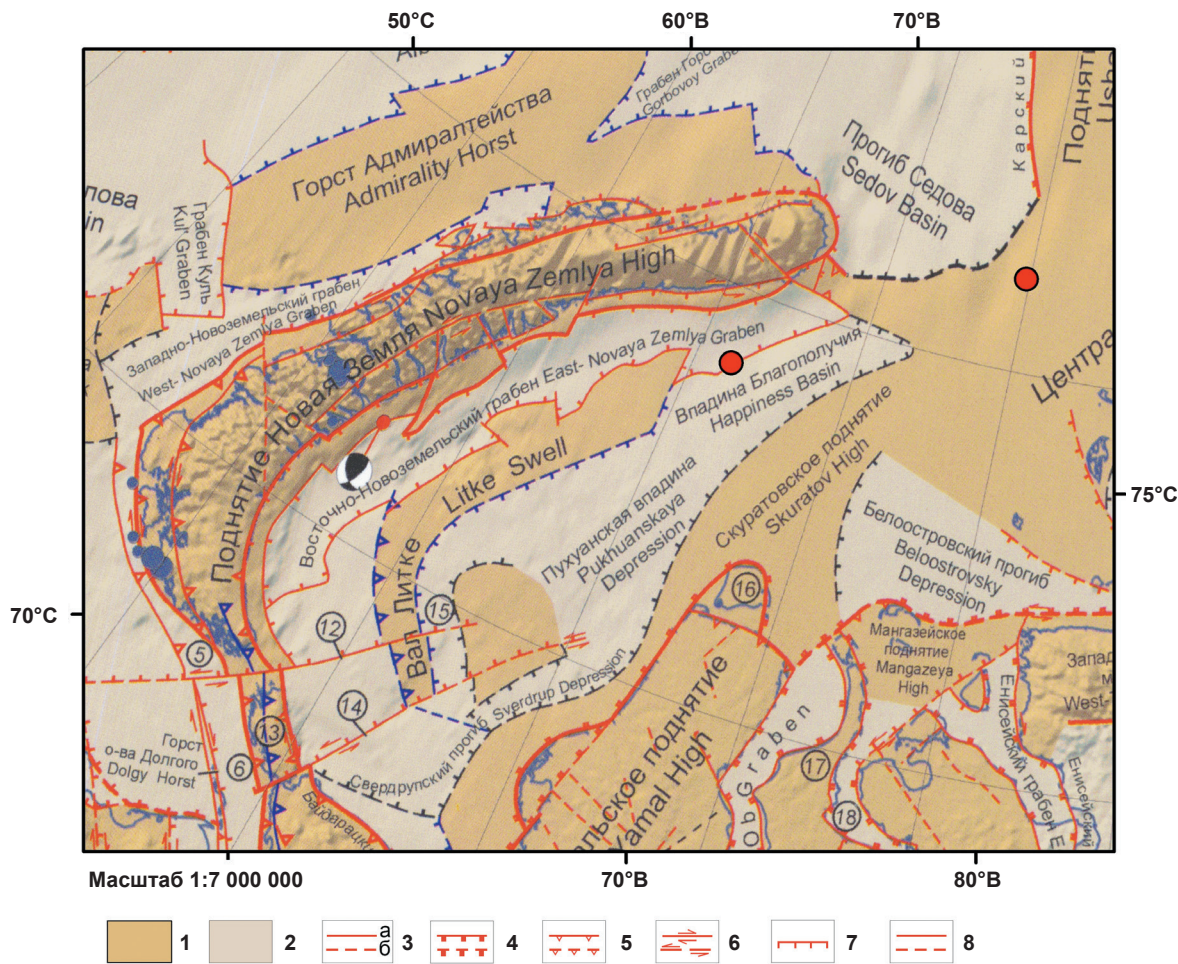


Рис. 3. Тектоническая карта района архипелага Новая Земля и землетрясений, зарегистрированных в Карском море 03.06.2022 и 11.06.2024. Неотектонические структуры, выраженные в рельефе шельфа (1–2): 1 – поднятия и горсты, 2 – впадины, грабены, рампы. Новейшие разломы: красные – активные (поздний неоплейстоцен-голоцен), синие – поздний плиоцен – средний неоплейстоцен) (3–8): 3а – достоверные, 3б – предполагаемые; 4 – сбросы (штрихи – на опущенном крыле), 5 – взбросы (треугольники – на приподнятом крыле), 6 – сдвиги (стрелками показано направление смещения), 7 – неустановленного типа (штрихи – на опущенном крыле), 8 – без установленного смещения

Fig. 3. Tectonic map of the Novaya Zemlya Archipelago area with earthquakes recorded in the Kara Sea on 03.06.2022 and 11.06.2024. Neotectonic structures expressed in the shelf relief (1–2): 1 – uplifts and mounds, 2 – depressions, grabens, ramps. Recent faults, red – active (Late Pleistocene-Holocene), blue – Late Pliocene-Middle Pleistocene) (3–8): 3a – reliable, 3b – inferred; 4 – normal faults (strokes – on bottom wail, 5 – reverse faults (triangles – on the raised wail), 6 – strike-slip faults (arrows show the direction of displacement), 7 – unidentified type (strokes – on the lowered wing), 8 – without identified displacement

на границе тектонических структур Мезенской синеклизы и Тиманского поднятия.

Записи арктических станций «Амдерма 1» и «Колба» (см. рис. 1) были проанализированы на предмет выявления техногенных событий, поскольку в райо-

нах их установки добываются полезные ископаемые. Составленная выборка событий для каждой станции была проанализирована путем применения разработанных критериев идентификации техногенной сейсмичности [26; 27]. Полученный результат представлен

Таблица 3. Сравнительный анализ критериев идентификации техногенных событий, зарегистрированных сейсмическими станциями «Амдерма 1» и «Колба»**Table 3. Comparative analysis of identification criteria of man-made events recorded by seismic stations “Amderma 1” and “Kolba”**

Критерий идентификации	Станция «Амдерма 1»	Станция «Колба»
Локация событий вблизи промышленного объекта	Эпицентры событий не совпадают с зоной Воркутинского горнопромышленного узла. Частично совпадают лишь эпицентральной окружности	Эпицентры событий частично совпадают с промышленными объектами
Анализ волновых форм	Волновые формы многих событий подобны	Типовые волновые формы определены только для зоны «Бухта Север»
Анализ СВАН-диаграмм	События на СВАН-диаграммах проявляются слабо	Наличие монохромных полос на СВАН-диаграммах указывает на техногенную природу событий
Соотношение амплитуд объемных Р- и S-волн	Среднее значение $S/P = 1,92$	Средние значения S/P для разных зон варьируются от 1,39 до 2,36
Суточное распределение событий	Критерий стоит учитывать в совокупности с другими факторами	Критерий стоит учитывать в совокупности с другими факторами
Магнитудное распределение событий	Магнитудный диапазон от 1,2 до 2,1	Магнитудный диапазон от 0,4 до 2,4

в табл. 3 и содержит информацию о сравнительном анализе критериев идентификации техногенных событий для обеих станций.

Техногенные события, выделенные на записях сейсмической станции «Амдерма 1», относятся к деятельности шахт Воркутинского горнопромышленного узла. Сейсмическая станция «Колба» регистрирует события в зоне добычи угля на полуострове Таймыр (Сырадасайское месторождение), а также результаты работ в районе портов «Бухта Север» и «Енисей».

Криосейсмология. Установка сейсмических станций на арктических архипелагах позволила заложить основы криосейсмологического мониторинга российской Арктики и начало ведения криосейсмологического бюллетеня. Первые результаты в этой области были получены по данным сейсмической станции «Северная Земля», расположенной на одноименном архипелаге [21]. За период ее функционирования с конца 2017 г. по настоящее время накоплена уникальная база данных о льдотрясениях. Первоочередной задачей является определение природы локальных низкомагнитудных событий, регистрируемых одиночной сейсмической станцией, установленной в грунте, а не на леднике, например [19; 20; 30—32]. В результате все события были разделены на группы А (землетрясения) и В (льдотрясения), различающиеся по спектральному составу и виду волновых форм. Примеры волновых форм и СВАН-диаграмм приведены на рис. 4.

Аналогичные работы начаты и на архипелаге Земля Франца-Иосифа. Выполнен анализ волновых форм и создан каталог локальных низкомагнитудных сейс-

мических событий, включающий около 80 событий с момента установки станции (2011—2024 гг.) Распределение эпицентров показано на рис. 5. Очевидно, что большая часть событий приурочена к окраине ледовых куполов, расположенных на островах Земля Александры и Земля Георга. Работа по идентификации их природы продолжается, трудность заключается среди прочего в отсутствии детальной тектонической карты рассматриваемых островов.

Деформационные волны. Проведены работы по изучению влияния хребтов Гаккеля и системы хребет Книповича — трог Лены на сейсмичность архипелага Новая Земля в соответствии с [11—13]. В результате получены интервалы времени, через которые возмущения достигают архипелага. Для системы хребет Книповича — трог Лены они составляют 1—2 года, для хребта Гаккеля — 3—5 лет. По результатам моделирования максимальный совместный вклад СОХ составляет 40—60% прикладываемых значений возмущений. Выделены наиболее геодинамически активные структуры и зоны концентрации тектонических напряжений. Землетрясения на архипелаге Новая Земля происходят вдоль разрывных нарушений на границе верхней и нижней коры. При движении блоков относительно друг друга триггером служат возмущения, распространяющиеся от СОХ, что исключает зарождение очага сильного землетрясения [4].

Выводы

Архангельская сейсмическая сеть в современной конфигурации представляет собой универсальный инструмент для мониторинга природных и техноген-

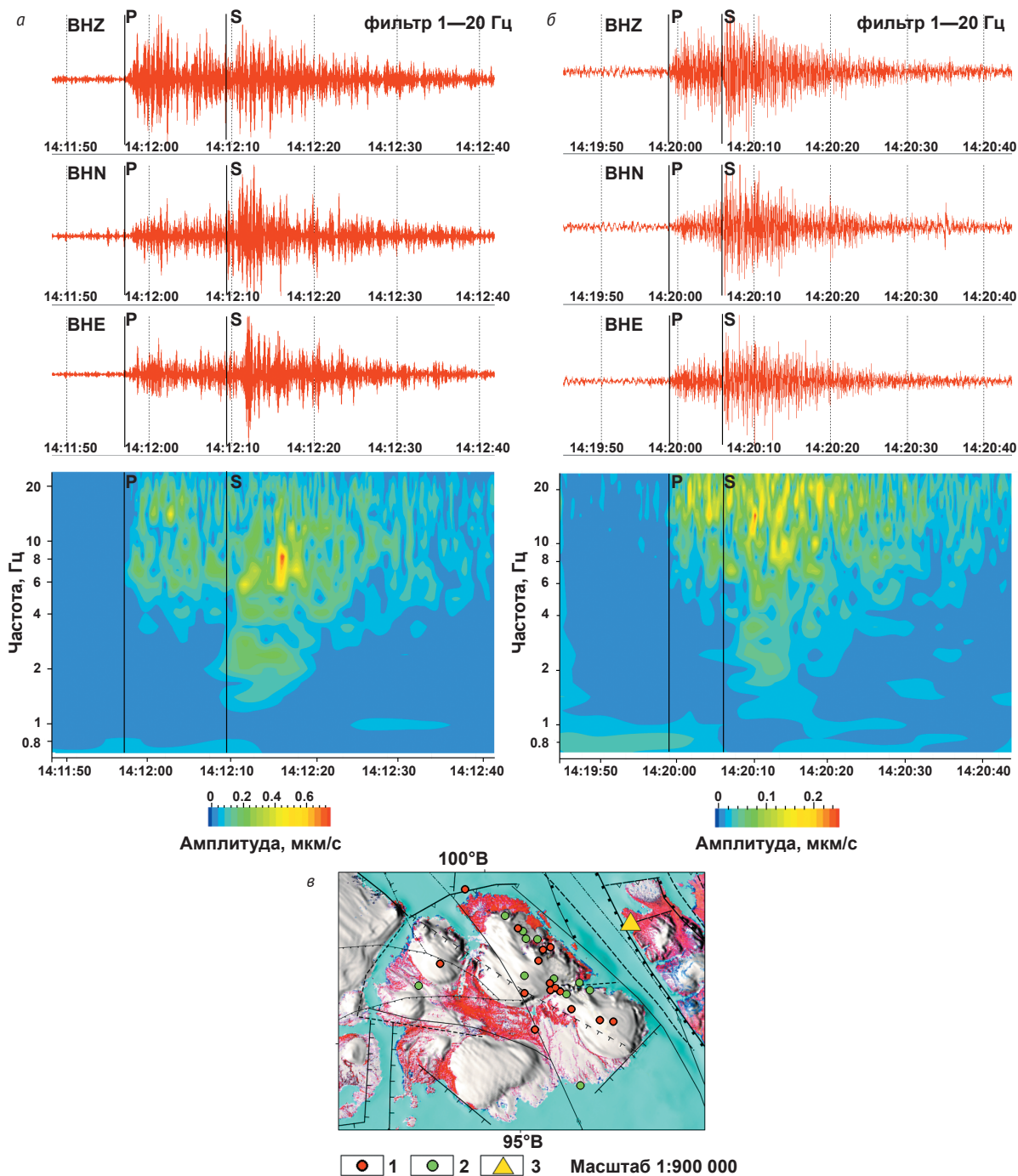


Рис. 4. Волновые формы для Z-, N- и E-каналов, СВАН-диаграммы и карта эпицентров локальных сейсмических событий, зарегистрированных станцией SVZ: а – группа А, б – группа В, в – карта распределения эпицентров землетрясений и ледотрясений (1 – землетрясения, 2 – ледотрясения, 3 – сейсмическая станция SVZ)

Fig. 4. Waveforms for Z-, N- and E-channels, STAN (spectral-time analysis) diagrams and map of epicenters of local seismic events recorded by the SVZ station: а – set A, б – set B, в – map of epicenters of earthquake and icequakes (1 – earthquakes, 2 – icequakes, 3 – SVZ seismic station)

ных опасностей западного сектора российской Арктики и трассы Северного морского пути. Представительный уровень магнитуды $M_{\text{пред}} = 3,0$ обеспечивает регистрацию слабой сейсмичности в районе Баренцево-Карского региона, архипелагов Новая Земля, Северная Земля и Земля Франца-Иосифа, срединно-океанических хребтов. Сеть позволяет проводить

исследования глубинного строения и геодинамики рассматриваемого региона. Начаты работы по изучению криосейсмологических процессов на российских арктических архипелагах, которые ранее не проводились. Считавшиеся асейсмичными территории постепенно относятся к слабосейсмичным. Регистрация низкомagnitude землетрясений на шельфовых

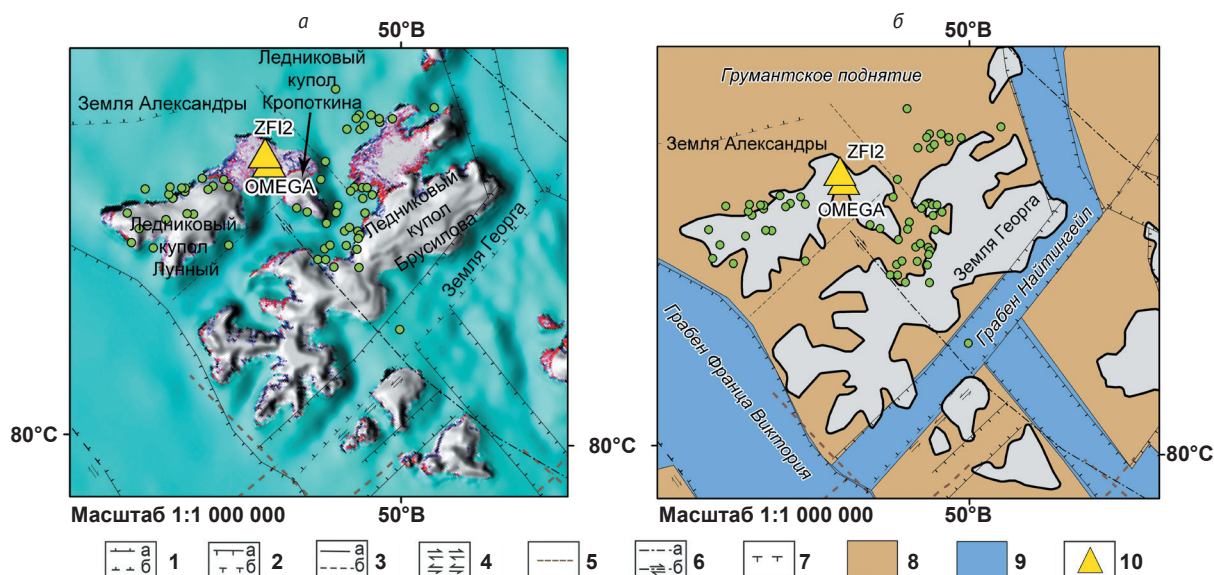


Рис. 5. Эпицентры локальных сейсмических событий, зарегистрированных в районе архипелага Земля Франца-Иосифа. Новейшие разломы (1–4) из [33]: а – достоверные, б – предполагаемые; 1 – сбросы, штрихи на опущенном крыле, 2 – разломы неустановленного типа, штрихи на опущенном крыле, 3 – разломы без установленного смещения, 4 – стрелками показано направление смещения при сдвигах. Разлом из [34]: 5 – неклассифицированные разломы. Разломы из [36] (6–7): 6 – сдвиговый сброс (стрелка – направление сброса), 7 – нормальные листрические разломы; 8 – зоны поднятий, 9 – зоны прогибов, 10 – сейсмические станции Архангельской сейсмической сети

Fig. 5. Epicenters of local seismic events recorded in the Franz Josef Land Archipelago area. Present-day faults (1–4) [33] (a – certain, b – inferred): 1 – normal faults, dashes on bottom wall, 2 – faults of unidentified type, dashes on bottom wall, 3 – faults without identified displacement, 4 – arrows show the direction of displacements in strike-slip faults. Faults [34] 5 – unclassified faults. Faults [36] (6–7): 6 – strike-slip fault (arrow indicates direction of fault), 7 – normal listric faults; 8 – uplift zones, 9 – depression zones, 10 – seismic station of the Arkhangelsk seismic network

территориях подчеркивает важность и актуальность проводимых исследований, а также необходимость развития сети сейсмических наблюдений в российской Арктике и накопления банка данных.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Архангельская сейсмическая сеть» (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/310187/>).

Финансирование

Исследование выполнено в рамках темы госзадания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, номер государственной регистрации 125021702395-9.

Литература/References

1. Антоновская Г. Н., Конечная Я. В., Ваганова Н. В. и др. Вклад уникальной научной установки «Архангельская сейсмическая сеть» в изучение сейсмичности российской Арктики // Геодинамика и тектонофизика. — 2022. — Т. 13, № 2. — DOI: 10.5800/GT-2022-13-2-0587.
- Antonovskaya G. N., Konechnaya Ya. V., Vaganova N. V., Basakina I. M., Morozov A. N., Shakhova E. V., Mikhaylova Ya. A., Danilov K. B. Contribution of the Large-Scale Research Facilities “Arkhangelsk Seismic Network” to the Russian Arctic Seismicity Study. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2022, vol. 13, no. 2. DOI: 10.5800/GT-2022-13-2-0587. (In Russian).

2. Konechnaya Y. V., Antonovskaya G. N. The seismic station “Franz Josef Land”. Book of abstracts 33rd General Assembly of the European Seismological Commission (GA ESC 2012), 19–24 August 2012, Moscow and Young Seismologist Training Course (YSTC 2012), 25–30 August 2012, Obninsk. Moscow, PH “Poligrafikvick”, 2012, pp. 49–50.

3. Антоновская Г. Н., Ковалев С. М., Конечная Я. В. и др. Новые сведения о сейсмичности российской Арктики по данным пункта сейсмических наблюдений «Северная Земля» // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2018. — Т. 64, № 2. — С. 170–181. — DOI: 10.20758/0555-2648-2018-64-2-170-181.

- Antonovskaya G. N., Kovalev S. M., Konechnaya Ya. V., Smirnov V. N., Danilov A. V. New information about the seismicity of the Russian Arctic based on the work of the seismic station “Severnaya Zemlya”. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2018, vol. 64, no. 2, pp. 170–181. DOI: 10.20758/0555-2648-2018-64-2-170-181. (In Russian).

4. Антоновская Г. Н., Конечная Я. В., Басакина И. М. Влияние срединно-океанических хребтов на сейсмичность архипелага Новая Земля // Геотектоника. — 2023. — № 6. — С. 1–16. — DOI: 10.31857/S0016853X23060036.

- Antonovskaya G. N., Konechnaya Ya. V., Basakina I. M. The Influence of Mid-Oceanic Ridges on the Seismicity of the Novaya Zemlya Archipelago. *Geotecton-*

- ics, 2023, vol. 57, no. 6, pp. 759—773. DOI: 10.1134/S0016852123060031.
5. Конечная Я. В., Антоновская Г. Н., Морозова Е. Р. Сравнительный анализ критериев распознавания техногенных событий по записям арктических сейсмических станций «Колба» и «Амдерма» // *Вопр. инженер. сейсмологии*. — 2024. — Т. 51, № 4. — С. 85—97. DOI:10.21455/VIS2024.4-7.
- Konechnaya Ya. V., Antonovskaya G. N., Morozova E. R. Comparative analysis of criteria for the identification of man-made events based on the records of the Arctic seismic stations “Kolba” and “Amderma”. *Voprosy inzhenernoi seismologii*, 2024, vol. 51, no. 4, pp. 85—97. DOI: 10.21455/VIS2024.4-7. (In Russian).
6. Morozov A. N., Vaganova N. V., Konechnaya Ya. 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. of Seismology*, 2015, vol. 19, iss. 1, pp. 219—230.
7. Морозов А. Н., Ваганова Н. В. Годографы региональных волн Р и S для районов спрединговых хребтов Евро-Арктического региона // *Вулканология и сейсмология*. — 2017. — № 2. — С. 59—67. — DOI: 10.7868/S0203030617020055.
- Morozov A. N., Vaganova N. V. The travel times of regional P and S for spreading ridges in the European Arctic. *J. Volcanology and Seismology*, 2017, vol. 11, no. 2, pp. 156—163. DOI: 10.1134/S0742046317020051.
8. Vinnik L., Kozlovskaya E., Oreshin S., Kosarev G., Piiponen K., Silvennoinen H. The lithosphere, LAB, LVZ and Lehmann discontinuity under central Fennoscandia from receiver functions. *Tectonophysics*, 2016, vol. 667, pp. 189—198.
9. Винник Л. П. Сейсмология приемных функций // *Физика Земли*. — 2019. — № 1. — С. 16—27. — DOI: 10.31857/S0002-33372019116-27.
- Vinnik L. P. Receiver function seismology. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 12—21. DOI: 10.1134/S1069351319010130.
10. Antonovskaya G. N., Basakina I. M., Vaganova N. V., Kapustian N. K., Konechnaya Y. V., Morozov A. N. Spatiotemporal Relationship between Arctic Mid-Ocean Ridge System and Intraplate Seismicity of the European Arctic. *Seismological Research Letters*, 2021, vol. 92, no. 5, pp. 2876—2890. Available at: <https://doi.org/10.1785/0220210024>.
11. Skordas E. S., Meyer K., Olson R., Kulhanek O. Causality between interplate (North Atlantic) and intraplate (Fennoscandia) seismicities. *Tectonophysics*, 1991, vol. 185, no. 3—4, pp. 295—307. DOI: 10.1016/0040-1951(91)90450-7.
12. Мухамедиев Ш. А., Грачев А. Ф., Юнга С. Л. Нестационарный динамический контроль сейсмической активности платформенных областей со стороны срединно-океанических хребтов // *Физика Земли*. — 2008. — № 1. — С. 12—22.
- Mukhamediev Sh. A., Grachev A. F., Yunga S. L. Unsteady dynamic monitoring of seismic activity of platform areas from the mid-oceanic ridges. *Fizika Zemli*, 2008, no. 1, pp. 12—22. (In Russian).
13. Быков В. Г. Предсказание и наблюдение деформационных волн Земли // *Геодинамика и тектонофизика*. — 2018. — Т. 9, № 3. — С. 721—754. URL: <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0369>.
- Bykov V. G. Prediction and observation of strain waves in the Earth. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 721—754. Available at: <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0369>. (In Russian).
14. Викулин А. В., Викулина С. А., Акманова Д. Р., Долгая А. А. Миграция сейсмической и вулканической активности как проявление волнового геодинамического процесса // *Геодинамика и тектонофизика*. — 2012. — Т. 3, № 1. — С. 1—18. — URL: <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-1-00058>.
- Vikulin A. V., Vikulina S. A., Akmanova D. R., Dolgaya A. A. Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2012, vol. 3, no. 1, pp. 1—18. Available at: <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-1-00058>. (In Russian).
15. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и медленные деформационные волны // *Физика Земли*. — 2020. — № 4. — С. 172—182. — DOI: 10.31857/S0002333720040055.
- Kuzmin Y. O. Recent geodynamics and slow deformation waves. *Izvestiya, Physics of the solid Earth*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 595—603. DOI: 10.31857/S0002333720040055.
16. Шерман С. И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция / Отв. ред. Г. А. Соболев. — Новосибирск: Гео, 2014. — 359 с.
- Sherman S. I. Seismic process and earthquake forecast: a tectonophysical concept. Ed. by G. A. Sobolev. *Novosibirsk, Geo*, 2014, 359 p. (In Russian).
17. Ekström G., Nettles M., Abers G. A. Glacial earthquakes. *Science*, 2003, vol. 302, no. 5645, pp. 622—624. DOI: 10.1126/science.1088057.
18. Ekström G., Nettles M., Tsai V. C. Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes. *Science*, 2006, vol. 311, no. 5768, pp. 1756—1758. DOI: 10.1126/science.1122112.
19. Podolskiy E. A., Walter F. Cryoseismology. *Rev. Geophys.*, 2016, vol. 54, pp. 708—758. DOI: 10.1002/2016RG000526.
20. Виноградов Ю. А., Федоров А. В., Баранов С. В. и др. О выделении айсбергообразующих льдотрясений по сейсмоинфразвуковым данным // *Лед и Снег*. — 2021. — Т. 61, № 2. — С. 262—270. — URL: <https://doi.org/10.31857/S2076673421020087>.
- Vinogradov Yu. A., Fedorov A. V., Baranov S. V., Asming V. E., Fedorov I. S. Identification of iceberg-forming ice quakes from seismic and infrasound data. *Led i Sneg*, 2021, vol. 61, no. 2, pp. 262—270. Available at: <https://doi.org/10.31857/S2076673421020087>. (In Russian).
21. Antonovskaya G. N., Kapustian N. K., Konechnaya Ya. V., Morozova E. R. Glacial and seismic events investigation from a single station record at Severnaya Zemlya archipelago (Arctic region). *J. of Seismology*, 2024, vol. 28., pp. 615—633. DOI: 10.1007/s10950-024-10208-5/.

22. Антоновская Г. Н., Конечная Я. В., Капустян Н. К., Морозова Е. Р. Криосейсмология архипелага Северная Земля — первые результаты стационарного мониторинга // Вулканология и сейсмология. — 2024. — № 4. — С. 85—100. — DOI: 10.31857/S0203030624040061.
- Antonovskaya G. N., Konechnaya Ya. V., Kapustian N. K., Morozova E. R. Cryoseismology of the Severnaya Zemlya Archipelago — the Beginning of Permanent Monitoring. *J. of Volcanology and Seismology*, 2024, vol. 18, no. 4, pp. 383—396. DOI: 10.1134/S0742046324700635.
23. Asming V., Prokudina A. System for Automatic Detection and Location of Seismic Events for Arbitrary Seismic Station Configuration NSDL. Abstracts of the 35th General Assembly of the European Seismological Commission (September 4—10, 2016, Sgonico, Italia), 2016, ESC, 373.
24. Kremenetskaya E., Asming V., Ringdal F. Seismic Location Calibration of the European Arctic. *Pure and Applied Geophysics*, 2001, vol. 158, pp. 117—128. Available at: <https://doi.org/10.1007/PL00001151>.
25. Морозов А. Н., Ваганова Н. В., Асминг В. Э., Евтюгина З. А. Шкала ML для западной части Евразийской Арктики // Рос. сейсмол. журн. — 2020. — Т. 2, № 4. — С. 63—68. — DOI: 10.35540/2686-7907.2020.4.06.
- Morozov A. N., Vaganova N. V., Asming V. E., Evtugina Z. A. ML scale for the western part of the Eurasian Arctic. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*, 2020, vol. 2, no. 2, pp. 63—68. DOI: 10.35540/2686-7907.2020.4.06. (In Russian).
26. Французова В. И., Николаев А. В., Морозов А. Н. Идентификация промышленных взрывов по данным региональной сейсмометрии в Архангельской области // Геокриология. Инженер. геология, гидрология, геокриология. — 2010. — № 5. — С. 433—445.
- Frazncuzova V. I., Nikolaev A. V., Morozov A. N. Identification of industrial explosions according to regional seismometry data in the Arkhangelsk region. *Geokriologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrologiya, geokriologiya*, 2010, no. 5, pp. 433—445.
27. Асминг В. Э., Кременецкая О. Е., Виноградов Ю. А., Евтюгина З. А. Использование критериев идентификации взрывов и землетрясений для уточнения оценки сейсмической опасности региона // Вестн. МГТУ. — 2010. — Т. 3, № 4/2. — С. 998—1007.
- Asming V. E., Kremenetskaya E. O., Vinogradov Y. A., Evtugina Z. A. Criteria of explosions and earthquakes identification for estimation of seismic danger of the region. *Vestnik MGTU*, 2010, vol. 3, no. 4/2, pp. 998—1007. (In Russian).
28. Elsasser W. M. Convection and stress propagation in the upper mantle. Application of Modern Physics to the Earth and Planetary Interiors. Ed. by S. K. Runcorn. Wiley-Intersci., NY, USA, 1969, pp. 223—246.
29. Морозов А. Н., Ваганова Н. В., Михайлова Я. А. и др. Рои землетрясений как свидетельство вулканотектонических процессов на ультрамедленном спрединговом хребте Гаккеля в Арктике // Геодинамика и тектонофизика. — 2024. — Т. 15, № 1. — DOI: 10.5800/GT-2024-15-1-0737.
- Morozov A. N., Vaganova N. V., Mikhailova Y. A., Morozova E. R., Starkov I. V. Earthquake Swarms as Evidence of Volcano-Tectonic Processes of the Slowest Spreading Gakkel Ridge in the Arctic. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2024, vol. 15, iss. 1. DOI: 10.5800/GT-2024-15-1-0737. (In Russian).
30. Köhler A., Maupin V., Nuth C., Van Pelt W. Characterization of seasonal glacial seismicity from a single-station on-ice record at Holtedahlfonna, Svalbard. *Annals of Glaciology*, 2019, vol. 60, no. 79. DOI: 10.1017/aog.2019.15.
31. Köhler A., Nuth C., Schweitzer J., Weidle C., Gibbons S. J. Regional passive seismic monitoring reveals dynamic glacier activity on Spitsbergen, Svalbard. *Polar Research*, 2015, vol. 34:1, 26178. DOI: 10.3402/polar.v34.26178.
32. Sánchez-Gómez P., Navarro F. J., Dowdeswell J. A., De Andrés E. Surface velocities and calving flux of the Academy of Sciences Ice Cap, Severnaya Zemlya. *Ice and Snow*, 2020, vol. 60, no. 1, pp. 19—28. DOI: 10.31857/S2076673420010020.
33. Атлас «Геология и полезные ископаемые шельфов России» / Гл. ред. М. Н. Алексеев. — М.: Науч. мир, 2004. — 279 с.
- Atlas "Geology and minerals of the Russian shelves". Ed. by M. N. Alekseev. Moscow, Nauchnyi mir, 2004, 279 p. (In Russian).
34. Spencer A. M., Embry A. F., Gautier D. L., Stupakova A. V., Sørensen K. (eds). Arctic Petroleum Geology. Geological Society Memoir 35. London, Geological Society, 2011, p. 661.
35. Pubellier M., Rossi P., Petrov O., Shokalsky S., St-Onge M., Khanchuk A., Pospelov I. Tectonic map of the Arctic. 1st ed., scale 1:10 000 000. St. Petersburg, VSEGEI Printing House, Russia, 2018.

Информация об авторах

Антоновская Галина Николаевна, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20).

Конечная Яна Викторовна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20); старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (249035, Россия, Обнинск, просп. Ленина, д. 189), e-mail: yanakon@mail.ru.

Ваганова Наталья Владиславовна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20).

Морозова Екатерина Руслановна, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20).

Михайлова Яна Александровна, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20).

ARKHANGELSK SEISMIC NETWORK: THE ARCTIC SEISMIC MONITORING RESULTS IN 2020—2024

Antonovskaya, G. N.¹, Konechnaya, Ya. V.^{1,2}, Vaganova, N. V.¹, Morozova, E. R.¹, Mikhailova, Ya. V.¹

¹ N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russian Federation)

² Federal Research Center "Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences" (Obninsk, Russian Federation)

The article was received on March 25, 2025

For citing

Antonovskaya G. N., Konechnaya Ya. V., Vaganova N. V., Morozova E. R., Mikhailova Ya. V. Arkhangelsk Seismic Network: the Arctic seismic monitoring results in 2020—2024. Arctic: Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 137—148. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-137-148. (In Russian).

Abstract

The article discusses the capabilities of the Arkhangelsk seismic network in Arctic study. The authors give brief results of such research areas as seismic monitoring, cryoseismology, and deformation waves. They also consider technical issues related to cleanup seismic catalogs from man-made events and icequakes. Over the last 5 years, the epicenters of 2500 earthquakes have been determined using the Arkhangelsk network stations, including those from the Novaya Zemlya Arch. and of the Kara Sea shelf areas. The representative magnitude level is 3.0. For the first time, seismic events have been recorded on the glaciers of the Franz Josef Land Archipelago, making it possible to begin monitoring of glacial activity of the archipelago several islands.

Keywords: Arctic, seismic research, earthquake, monitoring, Northern Sea Route, Arkhangelsk seismic network.

Funding

This study was funded by the Russian Federation Ministry of Science and Higher Education according to the research project No. 125021702395-9 of the FECIAR UrB RAS.

Information about the authors

Antonovskaya, Galina Nikolaevna, Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAS, Deputy Director for Research, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolskii Av., Arkhangelsk, Russia, 163020).

Konechnaya, Yana Viktorovna, PhD of Engineering Science, Leading Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolskii Av., Arkhangelsk, Russia, 163020); Senior Researcher, Federal Research Center "Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences" (189, Lenina Av., Obninsk, Russia, 249035), e-mail: yanakon@mail.ru.

Vaganova, Natalya Vladislavovna, PhD of Geological and Mineralogical Science, Leading Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolskii Av., Arkhangelsk, Russia, 163020).

Morozova, Ekaterina Ruslanovna, Junior Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolskii Av., Arkhangelsk, Russia, 163020).

Mikhailova, Yana Aleksandrovna, Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolskii Av., Arkhangelsk, Russia, 163020).