

АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ ВДОЛЬ ТРАССЫ СЕВМОРПУТИ В ЗАПАДНОМ СЕКТОРЕ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Е. В. Шахова^{*1}, И. М. Басакина¹, Е. Р. Морозова¹,
Я. В. Конечная^{1,2} и Я. А. Михайлова¹

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН, г. Архангельск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Обнинск, Калужская область, Россия

* Контакт: Евгения Васильевна Шахова, shahovaev@yandex.ru

В работе анализируется сейсмическая ситуация вдоль трассы Северного морского пути западного сектора Российской Арктики. Составлен сейсмический каталог района исследования за период с начала XX века по 2023 г. По результатам пространственного распределения землетрясений выделено 6 зон, характеризующихся разной степенью сейсмической активности. Наибольшая активность зафиксирована в районе архипелага Северная Земля и полуострова Таймыр, наименьшая – в юго-восточной части Баренцева моря. В каждой выделенной зоне дано сопоставление сейсмичности с имеющимися геофизическими сведениями (тепловой поток, тектоническая ситуация, гравио- и магнитные аномалии). Результаты могут служить основой для последующих исследований, связанных с оценкой потенциальных природно-техногенных рисков в пределах Севморпути.

Ключевые слова: Арктический регион, сейсмичность, магнитуда, тепловой поток, геодинамические процессы.

Цитирование: Шахова Е. В., Басакина И. М., Морозова Е. Р., Конечная Я. В. и Михайлова Я. А. Анализ сейсмической ситуации вдоль трассы Севморпути в западном секторе Российской Арктики // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES5019. — DOI: 10.2205/2025es001032 — EDN: HQGGNK

Введение

Одним из наиболее важных направлений развития морской транспортной логистики с экономической точки зрения является Северный морской путь (СМП). Трасса СМП имеет большой потенциал для расширения международной торговли и освоения богатств арктического региона. Однако, несмотря на колоссальный потенциал, развитие активного судоходства сдерживается рядом трудностей, одними из которых является сложные природно-климатические условия и недостаточная геолого-геофизическая изученность, связанная с труднодоступностью территорий. Глобальное потепление способствует уменьшению площади морских льдов и приводит к таянию мёрзлых грунтов, негативно влияющих на жилые, промышленные и инфраструктурные объекты.

В связи с этим мониторинг СМП становится неотъемлемой составляющей стратегии развития и обеспечения его безопасности. Применение современных технологий весьма востребовано, среди которых космическое мониторинговое сопровождение имеет первостепенное значение. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) в режиме близкого к реальному времени позволяет проводить мониторинг различных аспектов окружающей среды, включая ледовые условия, погодные события, состояние экосистемы и безопасность судоходства [Заболотских и др., 2023; Репина и Иванов, 2012]. Несмотря на все плюсы ДЗЗ результаты дешифрирования материалов должны подтверждаться полевыми исследованиями [Rathje and Adams, 2008].

<https://elibrary.ru/HQGGNK>

Получено: 5 августа 2024 г.

Принято: 26 июня 2025 г.

Опубликовано: 30 октября 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

На сегодняшний день трасса СМП крайне неравномерно охвачена инструментальными сейсмологическими наблюдениями, большая часть которых сосредоточена в западном секторе Российской Арктики [Антоновская и др., 2022]. По данным УНУ «Архангельская сейсмическая сеть» (АСС) Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лавёрова Уральского отделения Российской академии наук (ФИЦКИА УрО РАН) [Антоновская и др., 2022] в районе прохождения Северного морского пути ежегодно регистрируются сейсмические события различной природы. Благодаря открытию сейсмических станций в Арктике, стали фиксироваться сейсмические события в Карском и Баренцевом морях [Antonovskaya et al., 2024a] с представительной магнитудой регистрации $ML_{\text{пред.}} = 3,0$ [Антоновская и др., 2022].

Такие сведения являются новой информацией, требующей изучения природы сейсмических событий (землетрясения, взрывы, дегазация дна и т.д.), актуализации сейсмических каталогов, а далее актуализации карт общего сейсмического районирования и расчётных моделей, связанных с проектированием ответственных объектов (гидротехнические объекты, мосты, железные дороги и т.д.).

В рамках данной работы мы рассмотрим взаимосвязь сейсмичности с тектоникой региона и сопоставим с геофизическими полями над арктическими территориями вдоль СМП.

Описание методов и материалов

Для Арктического региона информация об исторических событиях практически недоступна, поэтому большое значение для оценки сейсмической опасности имеют землетрясения, зарегистрированные за инструментальный период. В настоящее время количество стационарных сейсмических станций в Евразийской Арктике является наибольшим за весь инструментальный период наблюдений. Однако условия для достоверной локации эпицентров землетрясений, особенно низкомагнитудных, остаются неблагоприятными по причине малого количества сейсмических станций, их удалённости друг от друга и геометрии их сети. В связи с этим для сводной обработки землетрясений в лаборатории сейсмологии ФИЦКИА УрО РАН используются все доступные исходные данные сейсмических станций Арктики. Кроме того, мы используем региональные годографы Barents [Kremenetskaya et al., 2001], NOES [Морозов и Ваганова, 2017], NORP [Морозов и Ваганова, 2011] и уточнённую для западной части Евразийской Арктики шкалу локальной магнитуды ML [Морозов и др., 2020].

В качестве временного интервала анализируемых сейсмических данных для создания обобщённого сейсмического каталога западного сектора Российской Арктики мы рассматривали период с начала XX века по 2023 г. За основу был взят каталог Международного сейсмологического центра (International Seismological Center, ISC) [International Seismological Centre, 2024], который был дополнен данными регионального [Морозов и Ваганова, 2024] и локального каталогов ФИЦКИА УрО РАН [Антоновская и др., 2023; Antonovskaya et al., 2024b]. Кроме этого, в полученный каталог мы внесли землетрясения, зарегистрированные только одной из станций АСС, тем самым максимально собрав все сведения о сейсмичности рассматриваемого региона.

В случае обработки низкомагнитудных землетрясений по данным одной станции мы использовали метод определения координат эпицентров землетрясений, реализованный в программе EL [Асминг, 2004]. Для минимизации возможной ошибки в определении координат таких эпицентров анализировались только землетрясения с чёткими вступлениями фаз P и S . Это менее достоверный способ локации, однако, по его результатам можно приблизительно определить основные закономерности распределения эпицентров событий.

Как известно, каталог ISC [International Seismological Centre, 2024] включает данные разных сейсмологических агентств и по каждому землетрясению приводятся различные типы магнитуд (ML , mb , Mw). Таким образом, для анализа сейсмических данных рассматриваемого региона первоочередной задачей являлось унификация разных типов магнитуд. Данному вопросу посвящено большое количество работ как

отечественных, так и зарубежных исследователей [Морозов и др., 2022б; Петрова и Куроха, 2023; Kim and Ottemöller, 2017]. В данной работе за унифицированную магнитуду мы взяли M_S , а для низкомагнитудных событий мы оставили магнитуду ML , т.к. формула пересчёта «не работает» в диапазоне низких магнитуд [Морозов и др., 2022б].

Дополнительно для каждой зоны был проведён расчёт значений сейсмической активности (табл. 1) как отношение суммарно выделившейся энергии к площади за рассматриваемый период.

В процессе обобщённой обработки землетрясений из Арктического региона задавалось фиксированное значение глубины гипоцентра (как правило, 10 км). Это связано с недостаточным количеством близкорасположенных к очагу сейсмических станций. Лишь в отдельных случаях удается определить глубину очага [Морозов и др., 2023].

Дополнительно к анализу пространственного распределения землетрясений привлекались геолого-геофизические сведения. Информация о пространственном распределении значений теплового потока была взята из международной базы по тепловому потоку [GHFDB, 2021]. Интерполяция данных производилась средствами программного комплекса ArcGis, с применением набора инструментов Spatial Analyst Tools – Торо to Raster. Данный метод интерполяции, основанный на программе ANUDEM, был специально разработан для создания корректных цифровых моделей рельефа [Hutchinson, 1989; Hutchinson et al., 2011]. Тепловой поток и магнитуда землетрясений имеют генетические связи, т.к. являются следствием процессов в литосфере. Если в литосфере температура и тепловой поток высокие, то породы становятся более пластичными. При увеличении напряженного состояния они флексураобразно деформируются без разрыва сплошности. Если при землетрясении происходит разрыв сплошности среды, то возможно наблюдать пониженные температуры и низкий тепловой поток [Хуторской и др., 2015, 2022].

Для выявления индивидуальных черт строения той или иной зоны, их геологического строения, тектонической структуры, геодинамических обстановок мы опирались на данные, представленные в [Атлас..., 2004; Метелкин и др., 2010; Тектоническая карта..., 2019; Хайн и Ломизе, 2005; Шаров и Журавлев, 2019; Arctic..., 2011].

Результаты исследования

Результаты сейсмического мониторинга с начала XX века по 2023 г. для западного сектора Российской Арктики показаны на рис. 1. Для дальнейшего анализа сейсмической ситуации района СМП данная территория была разделена на 6 зон (рис. 1). Границы зон были выбраны по двум категориям: отчасти они обусловлены разной тектоникой районов, отчасти разным характером проявления сейсмичности в этих районах. Но в целом, разбиение на зоны удобно для подробного анализа отдельных территорий в пределах большого арктического региона, через который проходит Севморпуть.

В табл. 1 приведены общие сведения для шести выделенных зон СМП. Представлены максимальные и минимальные значения магнитуд разного типа, средние значения теплового потока и значения сейсмической активности.

На рис. 2 представлено распределение теплового потока с сейсмичностью с начала XX века по 2023 г. в западном секторе Российской Арктики. В Южно-Баренцевоморской впадине значения фонового теплового потока составляют $58\text{--}66 \text{ мВт}/\text{м}^2$ (рис. 2). В этом районе мощность литосферы сокращается до 65 км, местами до 35 км. Согласно [Артюшков, 1993] здесь происходит растяжение блоков литосферы, сопровождающееся тепломассопотоком из-за аномальной верхней мантии. Для Балтийского щита и в восточном направлении в сторону Сибирской платформы, где кора более древняя, наблюдается снижение теплового потока. На западном побережье Ямала, в Южно-Карской впадине наблюдается повышенный тепловой поток (выше $70 \text{ мВт}/\text{м}^2$) (рис. 2), а для Ямalo-Гыданской синеклизы (о. Белый), северо-западных склонов Таймыра (о. Свердрупа) и на сопредельных континентальных участках п-ова Таймыр более низкие его значения [Хуторской и др., 2013]. Таким образом, наблюдается взаимосвязь величины теплового потока с мощностью литосферы.

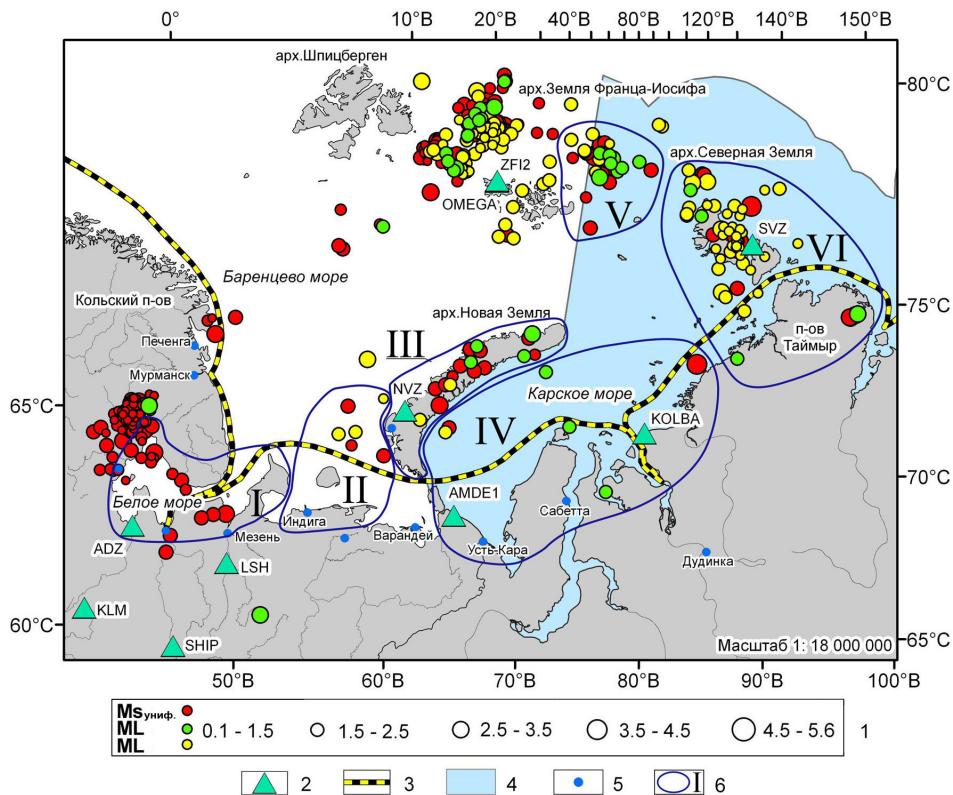


Рис. 1. Обзорная карта-схема западного сектора Российской Арктики с обозначением трассы и акватории СМП и расположением зон исследований сейсмичности с начала XX века по 2023 г. 1 – магнитуды сейсмических событий, определённые по разным типам волн. Кружки: красные – магнитуда $Ms_{\text{униф.}}$, зелёные – магнитуда ML , определённая по 3 и более станциям, жёлтые – магнитуда ML , рассчитанная по одной станции; 2 – сейсмические станции ФИЦКИА УрО РАН; 3 – трасса СМП; 4 – акватория СМП [Акватория..., 2024]; 5 – речные порты; 6 – зоны исследований.

Таблица 1. Зональное распределение значений магнитуд ($Ms_{\text{униф.}}$, ML), теплового потока и сейсмической активности

Зона	Кол-во землетрясений, шт.	Макс. магнитуда ML_{max}	Мин. магнитуда ML_{min}	Макс. магнитуда $Ms_{\text{униф.}}(\text{max})$	Мин. магнитуда $Ms_{\text{униф.}}(\text{min})$	Диапазон средних значений теплового потока Q , $\text{мВт}/\text{м}^2$	Сейсмическая активность A , $10^3 \text{Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$
I – Белое море и его прибрежная территория	25	–	–	4,3	0,3	20–40	50
II – Юго-восточная часть Баренцева моря	6	2,4	1,4	3,4	1,7	50–70	5
III – арх. Новая Земля	17	3,0	1,7	4,3	2,2	60–70	188
IV – Карское море	6	3,5	1,3	4,7	2,9	50–70	77
V – северо-восток от арх. Земля Франца-Иосифа	29	3,4	0,6	4,7	1,8	70–80	214
VI – арх. Северная Земля и северная часть п-ва Таймыр	57	3,5	0,2	5,6	2,9	50–70	2877

Мозаика разновеликих складчатых поясов древних блоков отражается на гравиметрической карте и карте аномалий магнитного поля Арктики (рис. 3). В сейсмоактивных районах согласно [Мартышко и др., 2016; Koulikov et al., 2013] отмечена корреляция геофизических аномалий с границами крупных тектонических структур, связанных

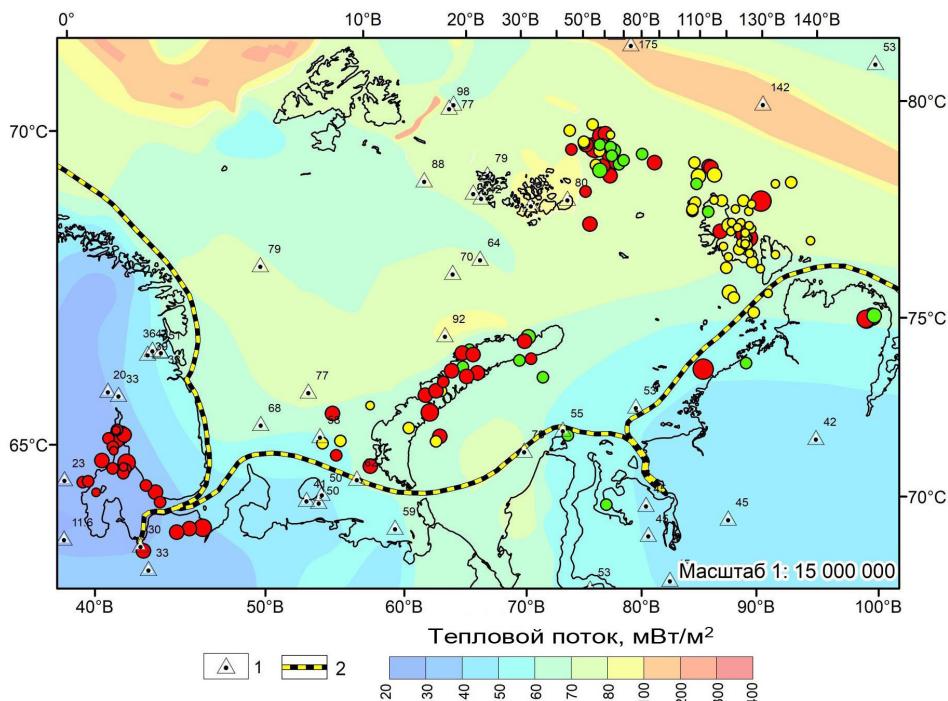


Рис. 2. Сейсмичность района СМП с начала XX века по 2023 г. на карте распределения теплового потока [Хуторской и др., 2015]. 1 – точка определения значения теплового потока; 2 – трасса СМП; (условные обозначения магнитуды – см. [рис. 1](#)).

с глубинными разломами. Мы сделали попытку рассмотреть аналогичные процессы для зон СМП. Согласно [Кочарян, 2016], считается, что землетрясения – есть результат внезапного проскальзывания на заранее существующем геологическом разломе. Большая часть рассматриваемых землетрясений соотносится с имеющимися разрывными нарушениями, согласно [Атлас..., 2004; Зархидзе и др., 2021; Колодяжный и др., 2019; Морозов и др., 2023; Тектоническая карта..., 2019; Arctic..., 2011; Avetisov, 1996].

На [рис. 3а,б](#) представлены фрагменты карты аномалий магнитного поля [Gaina and the CAMP-GM group, 2024] и гравиметрической карты России в редукции Буге [Гравиметрическая..., 2004] с наложением сейсмической информации по анализируемым зонам с начала XX века по 2023 г. и трассы СМП. Как видно из [рис. 3б](#), эпицентры землетрясений расположены относительно гравитационного поля в областях повышенного градиента, обычно связанных с разломами, а также в местах, где наблюдается увеличение гравитационной массы – на поднятиях (зеленое поле соответствует отрицательным аномалиям). В Беломорском подвижном поясе (зона I) большая часть событий соотносится с отрицательным полем, а блоки кимберлитового магматизма Юго-Восточного Беломорья и Кандалакшского грабена попадают на резкую смену магнитного поля ([рис. 3а](#)). В этой зоне трассируется серия параллельных линейных аномалий северо-западного простирания, по характеру соотношения с аномалиями поля силы тяжести ([рис. 3б](#)) выделяются интрузии основного, ультраосновного и щелочного составов.

В зоне II события сопоставляются с аномальным положительным магнитным полем от 50 до 200 нТл. Для зоны III по смене магнитного поля выделяется Главный Новоземельский разлом. Линейная аномалия силы тяжести северо-восточного простирания выделяет поднятый блок Пайхой-Новоземельского орегона по разлому. На данные гравитационных и магнитных аномалий, которые подтверждают субмеридиональные разломы, накладываются эпицентры 8 землетрясений, что видно на [рис. 3а,б](#) и 6. Таким образом, сопоставление гравитационных и магнитных данных с сейсмичностью выделяет границы тектонических структур по разломам и показывает активность этих блоков на современном этапе.

В зоне IV два события (24.05.2011 и 31.05.2015) попадают в область положительной аномалии, характеризующейся значениями 200–300 нТл, и приурочены к разломам. Событие 08.10.1963 г. с $M_{\text{ униф.}} = 4,7$ лежит в отрицательной магнитной аномалии, которую пересекает надвиговый фронт Большевик (рис. 3а, 7). Отрицательная магнитная аномалия выделяет Северо-Таймырскую зону дислокаций (разлом со сдвигом). Тут же аномалия отрицательного гравитационного поля (рис. 3б) указывает на прогиб (в данном случае – Харитона Лаптева) с переходом в положительный фон, соответствующая кромке Таймырского поднятия. Сопоставление гравитационных и магнитных данных с сейсмичностью позволяет выделить блочное строение земной коры на разных глубинах и показывает активизацию блоков Северо-Таймырской зоны на современном этапе.

В зоне V события соответствуют малым отрицательным значениям магнитного поля. Северо-Таймырская зона и значительная часть Карского шельфа (зона VI) подстилаются плитой с докембрийским фундаментом, имеют положительно-отрицательные значения магнитного поля. Столь резкая смена значений вызвана поднятыми блоками вдоль сдвигово-надвиговой зоны южного дугообразного обрамления Карской плиты.

По гравиметрическим данным выявляется тектоническое нарушение, разделяющее Тимано-Канинскую гряду и Кольскую моноклину. Кольцевая структура по Северокарскому мегапрогибу оконтуривается событиями с IV–V–VI зон (рис. 3б, 7, 9).

Мы видим, что аномалии магнитного и гравитационного поля соответствуют тектоническому нарушению или попадают в разломную зону вдоль крупных тектонических структур и коррелируют с сейсмическими событиями. Природа такого явления подтверждается в зоне I и в зонах с III по VI, о чем указано выше. Таким образом, сопоставление землетрясений с гравитационными и магнитными данными позволяет уточнить природу сейсмичности при локации эпицентров землетрясений в зонах тектонических нарушений или на контактах крупных блоков вдоль тектонических структур.

Далее рассмотрим взаимосвязь пространственного распределения сейсмичности, теплового потока и тектоники отдельно для каждой выделенной зоны.

Зона I. Белое море и его прибрежная территория

Главными источниками знаний об ощущимых землетрясениях Беломорского региона, включающего в себя акваторию Белого моря и окружающую территорию (рис. 1) до недавнего времени были письменные свидетельства за исторический период. В работе [Панасенко, 1977] отмечается, что только с 1962 г. можно выделить начало инструментального этапа в изучении сейсмичности данного региона.

Структура верхней части земной коры в Кандалакшско-Беломорской зоне имеет сложное, неоднородное строение. Беломорский подвижный пояс и Кандалакшская рифтовая система находятся в окружении крупных блоков: Балтийского щита и Каильского кратона. Гляциоизостатическое поднятие восточной части Балтийского щита, воздействия срединно-океанических хребтов, геодинамика литосферных плит, вызывают накопление напряжений в геологической среде, разрядка которых происходит на уже сформированных разломах. В табл. 2 представлен каталог из 25 землетрясений для зоны I (рис. 1).

Для 80 % событий, зарегистрированных в зоне I, магнитуды имеют значения $M_{\text{ униф.}} \geq 2$, у 32 % событий – $M_{\text{ униф.}} \geq 3$. Отметим наличие трех землетрясений с магнитудами ≥ 4 . События 30.06.1911 ($M_{\text{ униф.}} = 4,3$) и 05.11.2019 ($M_{\text{ униф.}} = 4,0$), приурочены к Колвицкому грабену. Землетрясение 23.01.1936 ($M_{\text{ униф.}} = 4,0$) зарегистрировано на Кулоиском выступе Мезенского мегавала. Значения теплового потока в этой зоне в среднем составляют $40 \text{ мВт}/\text{м}^2$ (рис. 2). Расчет сейсмической активности показал, что $A = 50 \times 10^3 \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$.

Большая часть выделенных событий примыкает к зонам рифейских палеорифтов, что отражено на рис. 4. Тепловой поток в рифтовых зонах соответствует низким значениям – $20\text{--}30 \text{ мВт}/\text{м}^2$ (рис. 2).

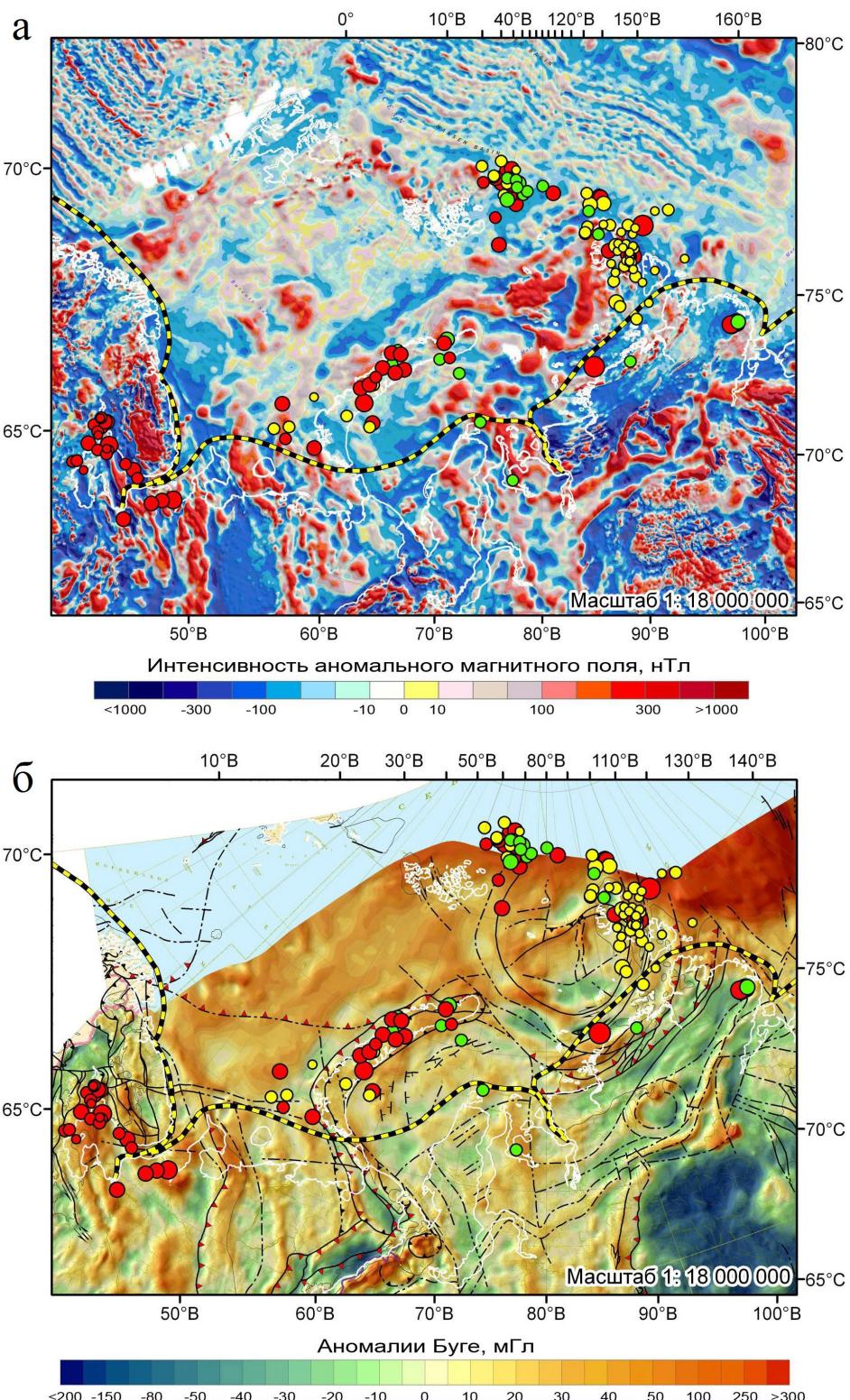


Рис. 3. Геофизические поля с нанесёнными эпицентрами землетрясений в западном секторе Российской Арктики с начала XX века по 2023 г. а – фрагмент карты аномалий магнитного поля Арктики [Gaina and the CAMP-GM group, 2024], б – фрагмент гравиметрической карты России [Гравиметрическая..., 2004] (условные обозначения магнитуды – см. рис. 1).

Таблица 2. Каталог землетрясений зоны I

Дата	Время	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	$M_{\text{ униф.}}$	Примечание
30.06.1911	07:10:20,0	66,20	35,60	4,3	[Morozov et al., 2019]
09.03.1913	–	64,80	34,30	2,5	[Morozov et al., 2019]
23.01.1936	06:00:00,0	66,20	43,40	4,0	[Morozov et al., 2019]
15.05.1937	00:00:00,0	66,10	37,90	2,5	[Morozov et al., 2019]
17.01.1958	09:42:23,0	65,70	34,13	3,0	[Morozov et al., 2019]
20.05.1967	23:18:15,0	66,48	33,70	3,9	[Morozov et al., 2019]
10.05.1970	04:08:11,4	65,93	42,61	3,4	[Morozov et al., 2019]
01.07.1971	19:04:14,0	66,03	35,87	2,4	[Morozov et al., 2019]
22.07.1986	07:48:42,2	65,77	35,15	2,1	[Morozov et al., 2019]
10.08.1989	10:10:12,0	66,14	38,81	3,2	[Morozov et al., 2019]
12.10.1989	10:23:39,6	64,94	34,53	2,3	[Morozov et al., 2019]
30.07.1991	02:19:19,7	66,71	33,23	2,1	[Morozov et al., 2019]
21.10.1991	04:47:10,9	65,60	42,01	2,9	[Morozov et al., 2019]
09.11.1995	01:10:26,5	66,76	33,91	3,5	[Morozov et al., 2019]
18.12.1999	12:25:39,5	66,33	33,25	2,3	[Morozov et al., 2019]
26.01.2001	13:48:38,1	65,89	35,98	2,1	[Morozov et al., 2019]
13.01.2002	06:03:46,2	66,25	33,97	2,0	[Morozov et al., 2019]
22.10.2005	17:46:44,8	64,49	40,95	2,8	[Morozov et al., 2019]
23.10.2005	00:34:06,3	66,64	33,29	1,3	[Morozov et al., 2019]
23.07.2006	01:32:08,8	66,00	39,58	2,2	[Morozov et al., 2019]
13.08.2011	11:54:52,2	66,18	34,23	0,8	[Morozov et al., 2019]
20.03.2014	13:56:40,7	64,87	35,52	0,8	[Morozov et al., 2019]
31.05.2015	00:40:34,5	66,68	33,21	0,3	[Morozov et al., 2019]
26.05.2016	04:46:00,7	66,04	35,66	0,7	[Morozov et al., 2019]
05.11.2019	17:31:57,5	66,70	33,74	2,8	[Morozov et al., 2019]

Беломорскому подвижному поясу (БПП) приписаны события, происходящие с западной стороны, которые соотносятся с окраиной Фенноскандинавского кристаллического щита, между Карельским и Кольским архейскими кратонами. БПП вместе с Колвицкой и Умбинской зонами подвергался трём стадиям метаморфизма [Козловский и др., 2020], вследствие которых в его структуре имеются разно ориентированные трещины и сдвиговые деформации.

Во внешней западной зоне Беломорского пояса, вовлечённой в коллизионные деформации и высокобарный метаморфизм беломорид [Божко и др., 2022] при сочленении с Карельским кратоном, зарегистрировано 15 сейсмических событий (рис. 4), которые приписаны к покровно-надвиговым структурам.

В зоне коллизионного меланжа Колвицкого террейна фиксируются два сейсмических события (рис. 4): 09.11.1995 с $M_{\text{ униф.}} = 3,5$ и 05.11.2019 с $M_{\text{ униф.}} = 3,9$. Землетрясения 01.07.1971, 26.01.2001 и 26.05.2016 произошли в пределах Кандалакшского грабена (рис. 4).

На севере Кандалакшского залива в 25 км западнее посёлка Умба Мурманской области 05.11.2019 г. ($t_0 = 17:31:57,5$) произошло землетрясение, которое, по некоторым признакам, можно назвать уникальным для данного региона. Во-первых, значение его магнитуды ML (напомним, что в табл. 2 указана унифицированная магнитуда) по данным Архангельской сейсмической сети 3,8, по данным сети Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН – 3,2, по данным Финской сейсмической сети – 2,8. При этом в период с 1996 по 2018 гг. магнитуды выше 3,0 в данном районе не регистрировались. Данное явление отмечено в работе [Морозов и др., 2022а] как возможное сейсмическое «молчание», которое является временным и «может означать большую длительность

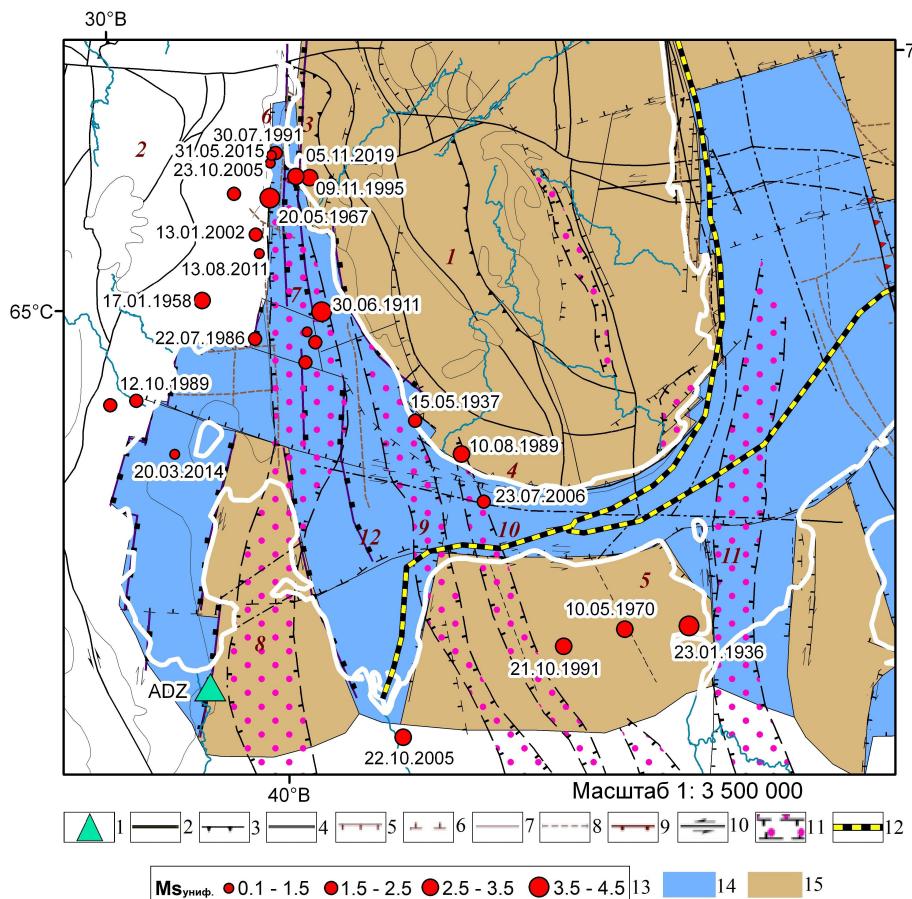


Рис. 4. Распределение эпицентров землетрясений в зоне I на карте неотектонических структур и разломов по [Атлас..., 2004; Тектоническая карта..., 2019; Arctic..., 2011]. 1 – сейсмическая станция; (2–4) согласно [Шаров и Журавлев, 2019]; 2 – сдвиги; 3 – сбросы; 4 – прочие разломы; (5–9) согласно [Атлас..., 2004]; 5 – установленные надвиги и взбросы; 6 – разломы неустановленного типа предполагаемые без смещения; 7 – сдвиги достоверные без смещения; 8 – разломы без смещения предполагаемые; 9 – сбросы достоверные со сдвигом; 10 – сдвиги (стрелка указывает направление смещения блоков); 11 – рифтовые комплексы; 12 – трасса СМП; 13 – магнитуда $M_{\text{суниф.}}$. Неотектонические структуры: 14 – зоны прогибов; 15 – зоны поднятий. Блоки и структуры (коричневые арабские цифры): 1 – Кольский кратон; 2 – Карельский кратон; 3 – Колвицкий террейн; 4 – Терский террейн; 5 – Кулоякский выступ; 6 – Колвицкий грабен; 7 – Кандалакшский грабен; 8 – Онежский грабен; 9 – Керецко-Пинежском грабен; 10 – Горло Белого моря; 11 – Мезенский грабен; 12 – Коллизионный шов между Карельским и Кольским кратонами.

периодов накопления напряжений и вероятность более сильных событий». Во-вторых, уточнённый эпицентр данного землетрясения ($\text{lat} = 66,7^\circ$, $\text{lon} = 33,74^\circ$) располагается у северного побережья Кандалакшского залива в Порьей губе. Данное событие соотносится с крупным глубинным разломом между Карельским и Кольским кратонами. Это коллизионный шов (1,95–1,90 млрд. лет), который начинается от раннепротерозойских метаморфических комплексов Порьей губы южного побережья Кольского полуострова и прослеживается на юго-восточную акваторию Белого моря. Событие можно приписать к центру асимметричного рифтинга (ножницеобразного), где в противоположных направлениях раскрываются Колвицкий и Кандалакшский грабен [Колодажный и др., 2019].

Прогрессирующее растяжение Кандалакшского грабена сопровождается процессами уже на современном этапе: разрушением береговых бортов грабена, образованием тектонических уступов, возможно, и за счёт гляциоизостатического поднятия и сбросовой кинематики, что подтверждается проявленной сейсмичностью на сбросах (рис. 4).

На современном этапе эволюции ещё не закончено клиновидное раскрытие Кандалакшского грабена, которое компенсируется правосдвиговым смещением вдоль трансформного разлома, развитого вдоль пролива Горло Белого моря. Данный факт подтверждается событием 23.07.2006, произошедшем на пересечении с Керенско-Пинежским грабеном. Сейсмические события в этой зоне могут повторяться.

На южном берегу Кольского п-ова в Терском террейне выделены два землетрясения (15.05.1937 и 10.08.1989), природа которых, возможно, связана с процессами сбросовой кинематики и/или гляциоизостатического поднятия.

Вывод по зоне I. Современная тектоническая активность отражается в проявлении сейсмических событий в покровно-наддвиговых структурах Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса. Данные за исторический [Ассиновская, 2004; Никонов, 2004; Панасенко, 1977] и инструментальный периоды наблюдений (табл. 2), а также проведённые расчёты указывают на то, что в районах продолжающегося раскрытия Колвицкого и Кандалакшского грабенов и в прилегающих к ним блоках от сдвиговых деформаций наблюдается сейсмичность со значением $A = 50 \times 10^3 \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$, но с относительно пониженным тепловым потоком.

Зона II. Юго-восточная часть Баренцева моря

Исследуемый район Баренцева моря (рис. 1) представлен следующими тектоническими элементами: Южно-Баренцевский мегаблок, Печорская синеклиза и Предновоземельская структурная область (рис. 5). В табл. 3 приведён каталог землетрясений для юго-восточной части Баренцева моря, включающий шесть событий. Иные сведения о землетрясениях в данном районе отсутствуют [Антоновская и др., 2023].

Отметим, что три события зарегистрированы одиночной станцией NVZ, открытой в 2022 г. [Антоновская и др., 2023]. Подобная информация показывает, что наши представления о сейсмичности рассматриваемого района неполны и нуждаются в дополнительных исследованиях.

Таблица 3. Каталог землетрясений зоны II

Дата	Время	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	ML	$M_{\text{S униф.}}$	Примечание
10.11.2002	11:04:36,4	70,46	49,51	–	1,7	[Морозов и Ваганова, 2024]
30.03.2006	10:46:02,1	70,68	52,88	–	2,6	[Morozov et al., 2017]
11.11.2009	04:18:20,4	71,53	47,04	–	3,4	[Морозов и Ваганова, 2024]
19.08.2022	09:40:41,2	70,92	49,15	2,3	–	зарегистрировано только с/с NVZ ACC
23.08.2022	10:19:30,8	72,38	49,93	1,4	–	зарегистрировано только с/с NVZ ACC
12.10.2022	12:25:34,3	70,56	47,79	2,4	–	зарегистрировано только с/с NVZ ACC

Землетрясение 11.11.2009 с $M_{\text{S униф.}} = 3,4$, $\text{lat} = 71,53^\circ$, $\text{lon} = 47,04^\circ$ произошло в структуре Гусинская банка Южно-Баренцевоморского мегаблока (рис. 5). Событие попадает в зону Рогачёвского разлома, где блок с гренвильским фундаментом надвигается на блок с фундаментом позднедокембрийского возраста [Зархидзе и др., 2021]. Событие 23.08.2022 (самое слабое по магнитуде – $ML = 1,4$), зафиксированное только станцией NVZ, приурочено к Западно-Новоземельскому грабену. Землетрясение 30.03.2006 попадает в область начала фронта деформаций Новоземельского орогена. Все три события находятся в зоне, для которой значения теплового потока составляют 60–70 мВт/м² (рис. 2).

Землетрясение, произошедшее 10.11.2002, $M_{\text{S униф.}} = 1,7$, $\text{lat} = 70,46^\circ$, $\text{lon} = 49,51^\circ$, и события, зафиксированные только одной станцией NVZ – 19.08.2022 и 12.10.2022 с магнитудами $ML = 2,3$ – $2,4$ (табл. 3), лежат в зоне разломов неклассифицированного типа, в области сочленения блоков Печорской и Баренцевоморской плит (рис. 5). Значения теплового потока для этой области составляют 50–70 мВт/м² (рис. 2). Сейсмическая активность данной зоны самая низкая из рассматриваемых – $A = 5 \times 10^3 \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$.

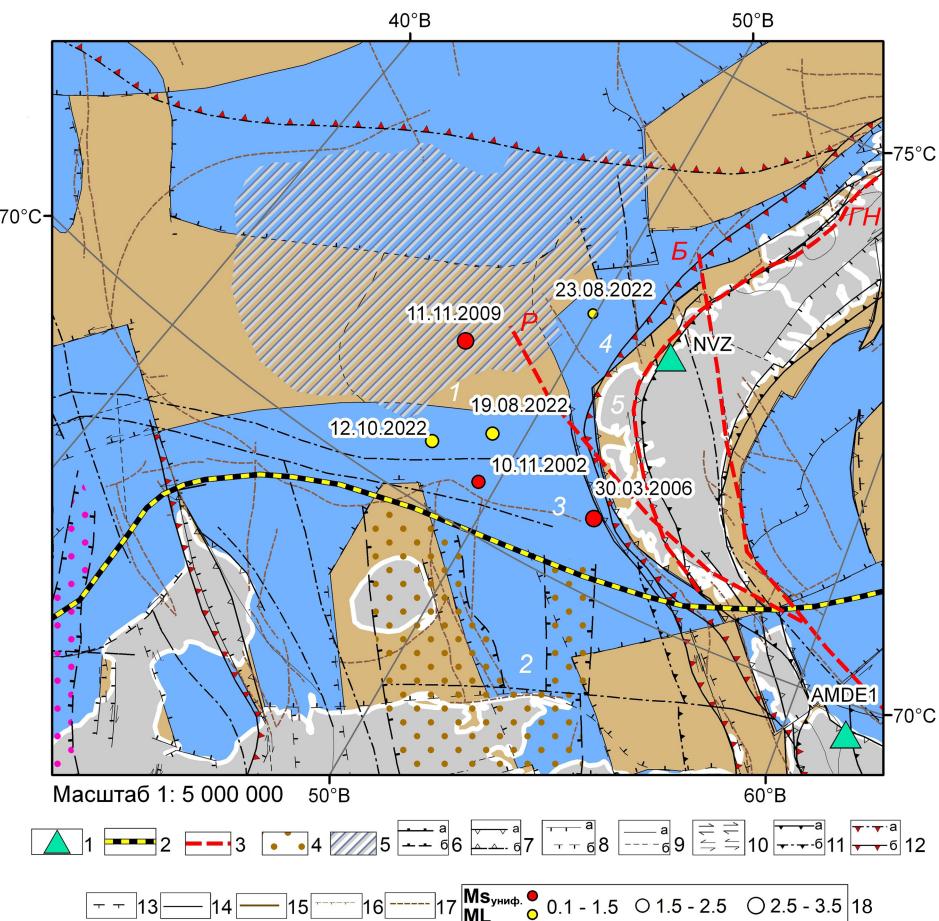


Рис. 5. Распределение эпицентров землетрясений в зоне II на карте неотектонических структур и разломов по [Атлас..., 2004; Тектоническая карта..., 2019; Arctic..., 2011]. 1 – сейсмологические станции; 2 – трасса СМП; 3 – разломы: Р – Рогачёвский разлом; Б – Байдарацкий разлом; ГН – Главный Новоземельский разлом; 4 – палеорифтовая система; 5 – Южно-Баренцевоморский мегаблок; (6–9) – новейшие разломы [Атлас..., 2004]: активные (поздний неоплейстоцен-голоцен; поздний плиоцен-средний неоплейстоцен): а – достоверные, б – предполагаемые; 6 – сбросы, штрихи на опущенном крыле; 7 – взбросы, треугольники на приподнятом крыле; 8 – разломы неустановленного типа, штрихи на опущенном крыле; 9 – разломы без установленного смещения; 10 – стрелками показано направление смещения при сдвигах. Разломы [Тектоническая карта..., 2019] (11–14): 11 – надвиг и взброс; 12 – фронт деформаций для орогенов; 13 – нормальные листрические разломы; 14 – не классифицированные разломы. Разломы [Arctic..., 2011] (15–17): 15 – активный спрединговый центр; 16 – нормальные разломы оффшоры; 17 – неклассифицированные разломы; 18 – классы и величины магнитуд (условные обозначения – см. рис. 1). Структуры: 1 – Гусинская банка, 2 – Печорская синеклиза, 3 – Предновоземельская структурная область, 4 – Западно-Новоземельский грабен, 5 – Новоземельский ороген.

Вывод по зоне II. Данная зона характеризуется низкой сейсмической активностью. Произошедшие землетрясения редки, они являются низкомагнитудными, при этом значения теплового потока определяются как повышенные.

Зона III. Архипелаг Новая Земля

Зона III включает в себя территорию архипелага Новая Земля (рис. 1), являющегося крупнейшим архипелагом в Российской Арктике. Он расположен в восточной части Баренцева моря, включает в себя два крупных острова – Северный и Южный, которые разделены узким проливом, и множество малых островов (рис. 6).

Первое землетрясение на архипелаге Новая Земля было зарегистрировано в 1986 г. Начиная с этого года и по 2023 г. в наш каталог вошло 17 землетрясений (табл. 4). Согласно [Антоновская и др., 2023; Antonovskaya et al., 2021], сейсмичность арх. Новая Земля отчасти связана с глобальными тектоническими процессами, происходящими под воздействием напряжений от срединно-океанических хребтов. Значения сейсмической активности составляет $A = 188 \times 10^3$ Дж/(км²·год), что определено выше, чем в первых двух зонах.

Таблица 4. Каталог землетрясений зоны III

Дата	Время	φ , °	λ , °	ML	$M_{s\text{униф.}}$	Примечание
01.08.1986	13:56:40,1	73,05	56,01	–	4,3	[Morozov et al., 2017]
13.06.1995	19:22:38,2	75,22	56,72	–	3,3	[Морозов и Ваганова, 2024]
23.02.2002	01:21:17,6	74,13	56,01	–	2,4	[Морозов и Ваганова, 2024]
08.10.2003	23:07:14,9	75,77	65,36	–	2,2	[Морозов и Ваганова, 2024]
11.10.2010	22:48:27,8	76,26	63,91	–	3,5	[International Seismological Centre, 2024]
04.03.2014	04:42:34,4	74,58	58,32	–	2,9	[Морозов и Ваганова, 2024]
02.05.2017	13:35:42,0	75,31	58,05	–	3,0	[Морозов и Ваганова, 2024]
27.01.2018	02:12:57,9	73,77	55,65	–	2,7	[Морозов и Ваганова, 2024]
28.01.2019	20:45:10,7	74,81	59,39	–	3,1	[Морозов и Ваганова, 2024]
17.02.2020	17:06:23,1	74,56	56,39	–	3,0	[Морозов и Ваганова, 2024]
23.08.2020	03:26:22,2	73,5	54,76	–	3,2	[Морозов и Ваганова, 2024]
12.04.2021	10:41:08,8	75,62	63,95	2,5	–	ACC
12.10.2021	15:45:09,0	76,43	64,21	3,0	–	ACC
09.06.2022	20:10:30,0	74,82	57,45	2,4	–	ACC
29.11.2022	12:36:49,6	73,83	56,18	2,0	–	зарегистрировано только с/с NVZ ACC
19.12.2022	07:38:18,5	72,32	54,66	1,7	–	зарегистрировано только с/с NVZ ACC
05.04.2023	19:38:28,0	75,41	57,40	2,3	–	ACC

Складчатый пояс арх. Новая Земля сформировался в результате раннекиммерийских тектонических движений, поля напряжений имеют восток–юго-восточное и запад–северо-западное направление, что подтверждают надвиги и обратная складчатость на западном склоне архипелага [Кораго и др., 2022]. Новоземельскую микроплиту, в которую входят складчатые системы Тиманского Кряжа и Пайхой–Новоземельского орогена, опоясывают древние плиты: Баренцевоморская (или Свальбардская), Тимано-Печорская и Западно-Сибирская.

Предновоземельская структурная область, представляющая собой зону надвигов и краевых поднятий, граничит с Баренцевской плитой и Новоземельским складчатым поясом. Фундамент арх. Новая Земля делится Байдарацким разломом на две части: с севера – мезопротерозойский фундамент Баренцевоморской плиты, на юге – неопротерозойский фундамент с вулканогенными отложениями, силлами и дайками габбрового состава. Полоса складчатости протягивается в северо-западном направлении через Пай-Хой–Вайгач, южную часть архипелага, и налагает на структуры Печорской плиты. Новоземельское поднятие с запада «подпирается» восточным краем Баренцевской плиты, а с северо-востока его поднимает «заглубившаяся под него» Карская плита.

Большинство эпицентров землетрясений, располагающихся в пределах о. Северный, преимущественно в южной его части и вдоль западного побережья, приурочено к субмеридиональным разломам (рис. 6).

Непосредственно к территории о. Южный относится эпицентр события 1986 г., приуроченный к области пересечения субмеридиональных и субширотных разломов и переходом от низкогорья к прибрежно-морской равнине [Avetisov, 1996]. А также событие 19.12.2022, зарегистрированное только станцией NVZ, находящееся на достоверном разломе северо-западного простирания (рис. 6).

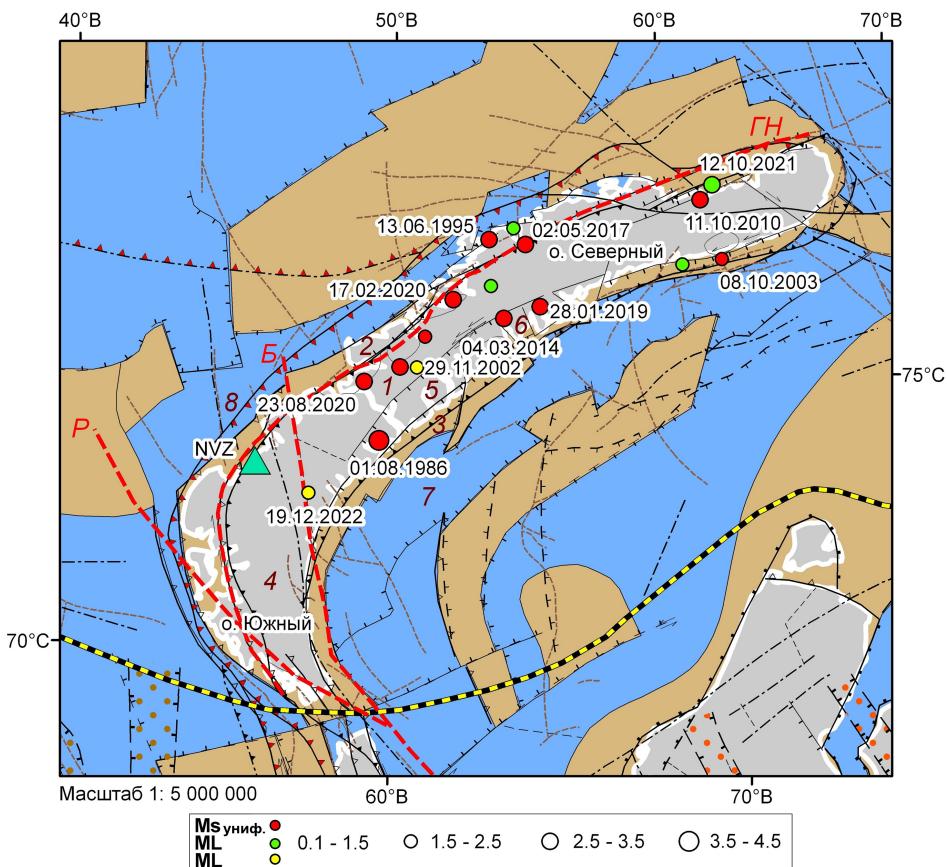


Рис. 6. Распределение эпицентров землетрясений в зоне III на карте неотектонических структур и разломов по [Атлас..., 2004; Тектоническая карта..., 2019; Arctic..., 2011] (условные обозначения – см. рис. 5). Центрально-Новоземельский мегантиклинорий: 1 – Северо-Новоземельский антиклиниорий; 2 – Западно-Новоземельский моноклинорий; 3 – блок Карского синклиниория; 4 – Южно-Новоземельский моноклинорий. Пайхойско-Новоземельская складчатая система: 5 – Восточнопахтусовский блок; 6 – Пахтусовский блок; 7 – Приновоземельская моноклиналь; 8 – Блок Предновоземельской региональной ступени. Разломы: ГН – Главный Новоземельский; Б – Байдарацкий; Р – Рогачёвский.

Значения магнитуд зарегистрированных землетрясений варьируют для ML от 1,7 до 3,0, для $Ms_{\text{униф.}}$ от 2,2 до 4,3. Самое сильное землетрясение с $Ms_{\text{униф.}} = 4,3$ произошло 01.08.1986 г., эпицентр которого приурочен к разлому в блоке Карского синклиниория.

Центрально-Новоземельский мегантиклинорий включает в себя: Западно-Новоземельский моноклинорий, Северо-Новоземельский антиклиниорий, Южно-Новоземельский и Карский синклиниорий. Коровые землетрясения, относящиеся к Центрально-Новоземельскому мегантиклинорию, попадают в зону глубинных разломов, связанных с мантийным прогибом, и происходят на глубинах от 20 до 40 км – на границе верхней и нижней коры [Морозов и др., 2023]. Событие 23.08.2020 г., произошедшее в Центральном блоке, приурочено к зоне коллизии межплатформенного орогенеза молассовой толщи с вулканитами. В области Главного Новоземельского разлома (долгоживущий глубинный шов, ширина на юге – 10–20 км, на севере – до 2–3 км) зафиксированы два землетрясения: 02.05.2017 и 17.02.2020. Для всех тектонических единиц Центрально-Новоземельского мегантиклинория характерна отчётливо линейная складчатость с большим количеством главных и второстепенных разрывных нарушений, в которых наблюдается разрядка напряжений [Зархицзе и др., 2021]. События 13.06.1995, 23.02.2002, 04.03.2014 и 28.01.2019 гг. приурочены к Предновоземельскому, Центральному, Восточнопахтусовскому и Пахтусовскому блокам соответственно.

В северной части о. Северный зафиксированы 4 события. Землетрясения 12.10.2021 с $ML = 3,0$ и 11.10.2010 с $Ms_{\text{униф.}} = 3,5$ относятся к Северо-Новоземельскому антиклиниорию; событие 12.04.2021 с $ML = 2,5$ зафиксировано в районе расположения Карского синклиниория. Данные тектонические структуры являются составной частью Пайхойско-Новоземельской складчатой системы. Эпицентр землетрясения 08.10.2003 с $Ms_{\text{униф.}} = 2,2$ попадает на пересечение разломных структур Припайхойско-Приновоземельской моноклизы.

Значения теплового потока в данной зоне составляют 60–70 мВт/м² (рис. 2).

Вывод по зоне III. В данной зоне землетрясения происходят вдоль выявленных разрывных нарушений разного порядка, преимущественно на границе верхней и нижней коры, что было отмечено в [Антоновская и др., 2023]. Значения теплового потока характеризуются как повышенные. Существование антибатной связи между значениями теплового потока и магнитудой землетрясений было статистически подтверждено ранее с помощью расчёта уравнений регрессии [Хуторской и др., 2022]. В силу редкой сети сейсмических станций и отсутствия представительной базы сейсмичности пока не представляется возможным выполнить расчёт корреляционной связи теплового потока в Западно-Арктической зоне. Предполагаем, что корреляционная антибатная связь для зоны III существует.

Зона IV. Карское море

В зоне IV (рис. 1) к рассмотрению попадают несколько крупных областей чехла Западно-Сибирской платформы: Припайхойско-Приновоземельская моноклиза, Южно-Карская синеклиза, включающая Западно-Карскую структурную зону, Русановско-Скуратовскую зону поднятий, Пур-Гыданский блок Западно-Сибирского бассейна. Из Таймыро-Североземельской складчатой области рассматривается Карская антиклинальная зона. В каталог вошли шесть землетрясений, зарегистрированных в этой зоне (табл. 5).

Таблица 5. Каталог землетрясений зоны IV

Дата	Время	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	ML	$Ms_{\text{униф.}}$	Примечание
08.10.1963	10:53:05,4	75,75	88,16	—	4,7	[Морозов и Ваганова, 2024]
16.08.1997	02.11:00,2	72,47	58,02	—	3,3	[Morozov et al., 2017]
24.05.2011	1:38:42,6	73,59	71,61	1,6	—	[International Seismological Centre, 2024]
31.05.2015	14:51:56,0	71,50	76,47	1,6	—	[International Seismological Centre, 2024]
03.06.2022	22:47:36,0	75,28	67,39	2,3	—	ACC
16.08.2022	12:54:08,7	72,28	57,85	1,9	—	зарегистрировано только с/с NVZ ACC

Припайхойско-Приновоземельская моноклиза, прилегающая к арх. Новая Земля и Пай-Хой, подразделяется на Приновоземельскую и Припайхойскую моноклинали. Отмечаются редкие землетрясения, происходящие в Приновоземельской моноклинали в разломной зоне Восточно-Новоземельского грабена, ближе к его восточному борту. Это землетрясения 16.08.1997 г. с $Ms_{\text{униф.}} = 3,3$ и 16.08.2022 г. с $ML = 1,9$. А также землетрясение 03.06.2022 г., произошедшее на шельфе Карского моря, которое является наиболее сильным ($ML = 2,3$) за весь инструментальный период наблюдений. Оно зарегистрировано шестью станциями различных сейсмологических сетей, в т.ч. тремя станциями ACC ФИЦКИА УрО РАН. Эпицентр приурочен к разрывному нарушению между впадиной Благополучия и Восточно-Новоземельским грабеном. Значения теплового потока находятся в пределах 60–70 мВт/м² (рис. 2).

Погруженная в Карское море часть Западно-Сибирской геосинеклизы является субмаринным бассейном. Ямalo-Гыданский артезианский бассейн соответствует

северной части Западно-Сибирской низменности – Ямало-Гыданской мегаседловине, включающей Северо-Ямальскую зону поднятий и Северо-Гыданскую региональную ступень. Бассейн является семимаринным, поскольку частично расположен на сушке [Метелкин и др., 2010]. На п-ове Гыданский в Колтогорско-Уренгойской рифтовой зоне произошло событие 31.05.2015 г. с $ML = 1,6$ (табл. 5). Около о. Белый, между Пухуанской впадиной и Белоостровским прогибом, зафиксировано землетрясение 24.05.2011 г. с $ML = 1,6$ (рис. 7). Событие 08.10.1963 г. с самой большой магнитудой $M_{s\text{ униф.}} = 4,7$ в этом районе (табл. 5, рис. 7) произошло в Северо-Таймырской зоне дислокаций на разломе со сдвигом в прогибе Харитона Лаптева. Значения теплового потока составляют 50–60 МВт/м² (рис. 2).

Несмотря на малое число землетрясений в каталоге, сейсмическая активность оценивается как $A = 77 \times 10^3$ Дж/(км²·год). Это значение в большей степени определяет землетрясение 08.10.1963 г. с $M_{s\text{ униф.}} = 4,7$. Сравнивая параметр A для арктических морей, отметим, что в Карском море сейсмическая активность немного выше по сравнению с Белым морем, и намного превышает сейсмическую активность юго-восточной части Баренцева моря.

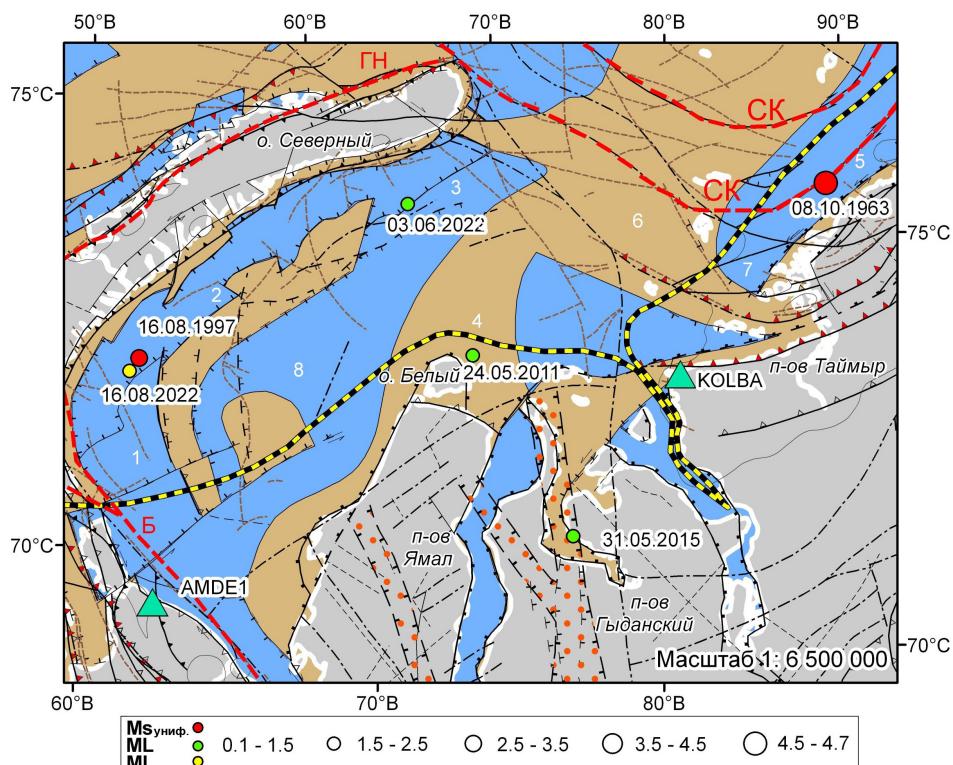


Рис. 7. Распределение эпицентров землетрясений в зоне IV на карте неотектонических структур и разломов по [Атлас..., 2004; Тектоническая карта..., 2019; Arctic..., 2011] (условные обозначения – см. рис. 5). Структуры: 1 – Припайхойско-Приновоземельская моноклина; 2 – Восточно-Новоземельский грабен; 3 – Впадина Благополучия; 4 – Скуратовское поднятие; 5 – Северо-Таймырская зона дислокаций; 6 – Центрально-Карское поднятие; 7 – прогиб Харитона Лаптева; 8 – Пухуанская впадина. Разломы: ГН – Главный Новоземельский, Б – Байдарацкий, СК – Северокарские.

Вывод по зоне IV. Перспективный на углеводороды Южно-Карский бассейн по количеству землетрясений относительно спокоен, но, с другой стороны, возможны сильные землетрясения. Землетрясения происходят вдоль разрывных нарушений в зонах дислокаций Северо-Таймырской зоны поднятий и в рифтовых грабенах чехла Западно-Сибирской платформы. Значения теплового потока характеризуются как повышенные.

Зона V. Северо-восток от арх. Земля Франца-Иосифа

В зоне V (рис. 1) рассматривается сейсмичность в основных геологических структурах: грабене Святой Анны и вдоль Баренцево-Карского борта котловины Нансена (рис. 8). Между желобами Воронина и Святой Анны располагается обширная платообразная возвышенность, известная как Центральное Карское плато. Минимальные глубины дна моря, равные 20–40 м, соответствуют поднятиям Ушакова и Визе. Прогиб Святой Анны северо-северо-восточного направления является неотектоническим жёлобом, выраженным в рельфе дна моря. Фундамент желоба Св. Анны гетерогенный, образованный разнородными структурами на границе древней Баренцевской плиты и молодой Карской микроплиты, залегает на глубине до 14 км. К северу от 80° с. ш. этот прогиб подобно зоне Франц-Виктория замыкается, формируя седловину между окраинношельзовыми поднятиями Земли Франца-Иосифа и поднятием Ушакова.

Баренцево-Карский борт котловины Нансена – это склон простого строения; в плане имеет форму очень пологой, выступающей к северу дуги в сочетании с примыкающим к нему подъёмом.

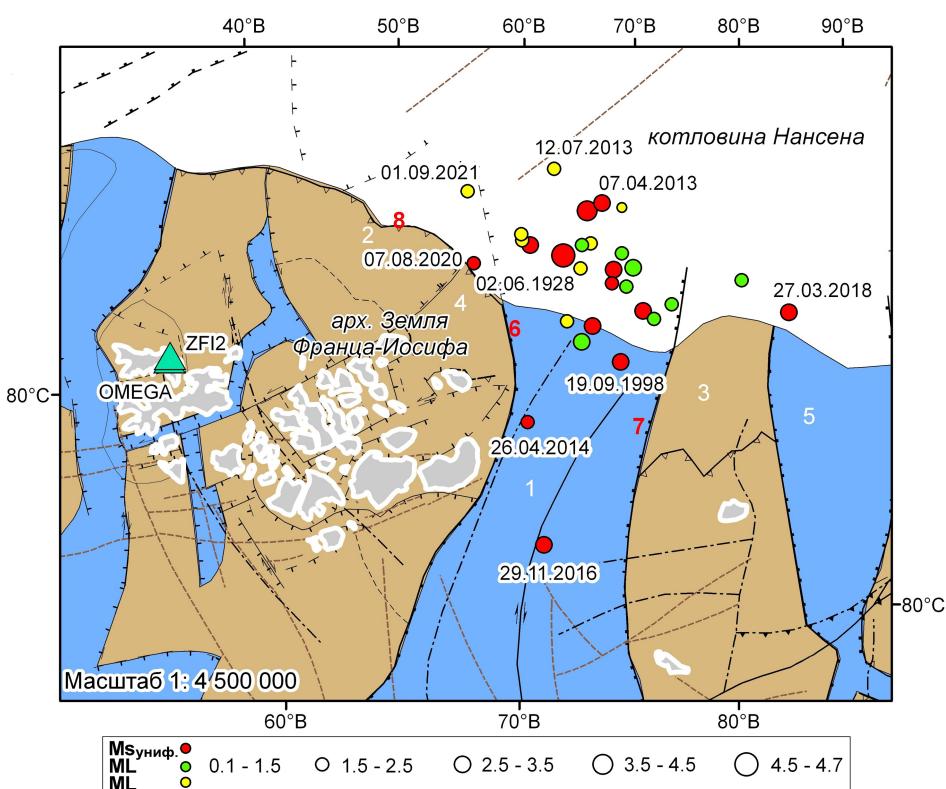


Рис. 8. Распределение эпицентров землетрясений в зоне V на карте неотектонических структур и разломов по [Атлас..., 2004; Тектоническая карта..., 2019; Arctic..., 2011] (условные обозначения – см. рис. 5). 1 – грабен Святой Анны; 2 – поднятие Воронина; 3 – поднятие Ушакова; 4 – поднятие Иогансена; 5 – грабен Воронина; 6 – Западно-Карский разлом; 7 – Карский разлом; 8 – разлом Брусилова.

Землетрясения в данной зоне отражены в каталоге, представленном в табл. 6. В центре желоба Святой Анны, в широкой его части зафиксировано событие 29.11.2016 с $M_{\text{униф.}} = 2,7$. Землетрясение 26.04.2014 с $M_{\text{униф.}} = 2,2$ приурочено к Западно-Карскому разлому центральной части желоба Святой Анны. Событие 01.09.2021 с $M_{\text{униф.}} = 2,2$ попадает на продолжение этого разлома, но приурочено к борту котловины Нансена. Землетрясение 07.08.2020 с $M_{\text{униф.}} = 2,2$ произошло на поднятии Иогансена по разлому Брусилова, попадает в рифтовую зону (рис. 8). Значения теплового потока находятся в пределах 70–80 мВт/м² (рис. 2).

Большинство эпицентров землетрясений зафиксировано в районе континентального подножия. Группа событий 19.09.1998, 07.06.2012, 07.05.2020 и другие попадают на пересечение центральной зоны устьевой части гр. Святой Анны и склона Баренцево-Карского борта котловины Нансена.

Сейсмическая активность данной зоны ($A = 214 \times 10^3 \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$) сравнима с зоной III (арх. Новая Земля).

Таблица 6. Каталог землетрясений зоны V

Дата	Время	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	ML	$M_{\text{униф.}}$	Примечание
02.06.1928	20:13:07,0	82,93	67,60	–	4,7	[Морозов и Ваганова, 2024]
24.01.1976	19:09:28,7	83,35	68,61	–	3,6	[Morozov et al., 2018]
19.09.1998	19:39:27,7	82,11	72,56	–	3,3	[International Seismological Centre, 2024]
08.04.2012	21:51:10,8	82,77	71,27	–	1,8	[Морозов и Ваганова, 2024]
03.05.2012	08:51:10,8	82,97	64,53	2,2	–	зарегистрировано только с/с ZFI2/OMEGA ACC
07.06.2012	00:55:06,0	82,38	68,75	2,1	–	зарегистрировано только с/с ZFI2/OMEGA ACC
11.10.2012	09:28:51,2	83,43	71,14	0,6	–	зарегистрировано только с/с ZFI2/OMEGA ACC
12.03.2013	01:05:24,6	83,02	64,35	1,8	–	зарегистрировано только с/с ZFI2/OMEGA ACC
12.03.2013	14:26:09,8	82,85	68,96	1,7	–	зарегистрировано только с/с ZFI2/OMEGA ACC
03.04.2013	12:40:38,1	83,08	69,33	2,0	–	зарегистрировано только с/с ZFI2/OMEGA ACC
07.04.2013	15:58:23,7	83,44	69,60	–	3,1	[Морозов и Ваганова, 2024]
12.07.2013	01:31:36,8	83,64	65,44	2,1	–	зарегистрированное только с/с ZFI2/OMEGA ACC
26.04.2014	19:51:05,0	81,46	67,65	–	2,3	[Морозов и Ваганова, 2024]
29.11.2016	01:55:56,3	80,45	69,84	–	2,7	[Морозов и Ваганова, 2024]
18.01.2018	23:38:11,4	82,89	71,23	–	2,7	[Морозов и Ваганова, 2024]
17.03.2018	22:24:59,7	82,57	73,60	–	3,1	[Морозов и Ваганова, 2024]
27.03.2018	11:27:42,2	82,59	83,35	–	2,8	[Морозов и Ваганова, 2024]
07.05.2019	10:02:16,7	82,95	65,16	–	2,6	[Морозов и Ваганова, 2024]
07.05.2020	06:11:11,0	82,38	70,44	–	2,7	[Морозов и Ваганова, 2024]
07.08.2020	20:59:14,0	82,66	61,80	–	2,2	[Морозов и Ваганова, 2024]
21.02.2021	22:06:14,0	82,76	72,28	2,4	–	ACC
01.09.2021	15:33:06,4	83,23	59,72	2,2	–	зарегистрировано только с/с ZFI2/OMEGA ACC
17.03.2022	11:09:30,0	82,88	80,20	2,4	–	ACC
17.03.2022	12:05:34,0	83,05	68,73	2,5	–	ACC
25.03.2022	06:24:56,0	83,04	71,64	2,5	–	ACC
01.05.2022	18:28:12,0	82,93	72,57	3,4	–	ACC
05.06.2022	15:05:18,0	82,51	74,38	2,5	–	ACC
05.10.2022	16:16:08,0	82,23	69,93	3,2	–	ACC
15.03.2023	05:16:46,0	82,65	75,47	2,5	–	ACC

Выход по зоне V. Рассматриваемая зона характеризуется достаточно большим числом слабых землетрясений, которые приурочены к основным тектоническим структурам региона. Выявленная тектоническая активность вдоль борта Баренцево-Карской котловины Нансена, которая выражается в более 20 сейсмических событиях при повышенном значении теплового потока.

Зона VI. Архипелаг Северная Земля и северная часть п-ова Таймыр

Острова крупного архипелага Северная Земля и северная часть п-ова Таймыр (рис. 1) рассматриваются как единая микроплита с докембрийским фундаментом и составляют Северо-Таймырскую складчатую зону (рис. 9). Она отделена Главным Таймырским надвигом от Центрально-Таймырской зоны, который отвечает неопротерозойскому аккреционному поясу.

Южно-Таймырская зона представляет собой глубокий прогиб с дислоцированными отложениями вследствие сильного тектонического давления со стороны Центрально- и Северо-Таймырской зон.

Северо-Таймырская складчатая зона представляет собой склон и подножье Карской континентальной плиты, перекрытой палеозойским осадочным чехлом. Структуры основания данной зоны простираются на значительную часть Карского шельфа. Основные тектонические элементы Карской плиты ориентированы в соответствии с простирианием коллизионных поясов и крупнейших сдвигово-надвиговых зон её южного дугообразного ограничения. Северная и северо-восточная часть плиты срезана котловиной Нансена.

Арх. Северная Земля отделен от п-ова Таймыр проливом Вилькицкого (рис. 9). Осадочный чехол Северо-Карского бассейна обнажается на островах арх. Северная Земля.

Для района исследования – архипелага Северная Земля и полуострова Таймыр, был составлен единый каталог землетрясений, зарегистрированных за весь инструментальный период наблюдений (табл. 7), включая данные новой сейсмической станции SVZ, установленной на архипелаге в 2016 г. Установка сейсмической станции позволила значительно продвинуться в исследовании этой арктической территории, в частности разделить ледовую сейсмическую активность и события в земной коре [Antonovskaya *et al.*, 2024b].

Таблица 7. Каталог землетрясений зоны VI

Дата	Время	φ , °	λ , °	ML	$M_{s\text{униф.}}$	Примечание
19.10.1924	15:34:45,7	80,50	104,37	–	5,6	[Морозов и Ваганова, 2024]
07.08.1978	12:48:23,0	79,69	99,15	–	4,3	[Морозов и Ваганова, 2024]
07.08.1978	13:35:16,1	79,54	99,66	–	3,9	[Morozov <i>et al.</i> , 2018]
19.05.1986	13:52:34,3	75,50	111,28	–	4,4	[Morozov <i>et al.</i> , 2018]
04.07.1995	03:26:17,1	80,02	95,02	–	3,5	[International Seismological Centre, 2024]
14.09.1996	19:29:43,5	75,54	110,42	–	3,7	[International Seismological Centre, 2024]
22.06.1999	21:21:21,2	82,15	96,43	–	3,0	[Морозов и Ваганова, 2024]
27.10.2012	04:48:55,3	80,80	108,48	0,6	–	зарегистрировано только с/с ZFI2 ACC
10.03.2013	21:15:21,4	82,40	93,25	2,3	–	зарегистрировано только с/с ZFI2 ACC
22.02.2016	08:20:47,2	82,1	96,77	–	2,9	[Морозов и Ваганова, 2024]
10.12.2016	03:00:23,6	81,06	95,46	1,5	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
10.01.2017	01:26:36,5	77,83	94,38	2,1	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
11.01.2017	07:43:05,5	78,01	96,61	–	2,9	[International Seismological Centre, 2024]
07.03.2017	17:10:17,5	79,22	98,57	1,9	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC

Продолжение на следующей странице

Таблица 7. Каталог землетрясений зоны VI (Продолжение)

Дата	Время	φ , °	λ , °	ML	$M_{s\text{униф.}}$	Примечание
13.03.2017	08:56:28,7	80,92	90,63	1,7	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
19.03.2017	19:48:48,7	79,33	98,73	1,2	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
08.05.2017	06:33:42,1	80,87	90,56	1,8	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
09.07.2017	17:43:32,9	78,77	98,85	1,6	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
19.07.2017	5:20:06,0	78,83	94,41	1,6	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
22.08.2017	01:51:15,9	77,19	96,65	1,7	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
23.08.2017	10:30:09,4	80,58	111,38	2,0	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
01.09.2017	17:50:51,1	81,84	97,07	2,9	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
04.09.2017	10:59:37,9	80,97	96,96	1,6	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
25.09.2017	23:52:16,1	81,94	93,41	2,9	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
07.10.2017	09:08:51,0	80,09	99,19	1,3	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
22.10.2017	19:07:07,2	80,35	101,38	1,1	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
21.11.2017	13:11:22,7	79,47	98,00	1,1	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
17.12.2017	12:27:56,9	79,37	98,59	1,0	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
03.01.2018	23:12:35,0	79,33	99,17	0,6	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
14.04.2018	16:36:19,3	79,06	98,87	0,6	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
28.04.2018	03:39:49,6	79,36	98,68	0,7	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
02.05.2018	15:26:28,2	81,12	91,44	1,9	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
02.06.2018	14:11:42,7	79,29	97,39	1,8	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
03.06.2018	23:05:02,6	77,64	99,57	1,3	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
24.07.2018	16:51:23,0	79,53	99,53	1,5	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
21.05.2019	03:45:11,5	75,51	110,47	–	3,9	[International Seismological Centre, 2024]
06.01.2020	20:00:54,6	79,92	96,91	1,2	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
07.07.2020	03:39:30,2	79,55	99,35	1,1	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
23.08.2020	16:50:02,4	79,53	98,99	0,9	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC
04.03.2022	22:45:00,0	79,73	99,34	0,2	–	зарегистрировано только c/c SVZ ACC

Продолжение на следующей странице

Таблица 7. Каталог землетрясений зоны VI (Продолжение)

Дата	Время	φ , °	λ , °	ML	$M_{s\text{униф.}}$	Примечание
06.03.2022	03:33:35,5	79,40	98,72	0,5	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
11.03.2022	14:56:39,0	78,72	102,86	0,7	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
14.03.2022	11:17:54,0	75,68	93,81	2,0	–	ACC
09.05.2022	23:56:45,2	80,13	96,91	2,9	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
17.05.2022	20:45:41,3	78,03	93,91	3,5	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
13.11.2022	16:41:28,8	79,78	100,67	0,9	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
13.11.2022	15:54:05,2	80,74	101,12	2,0	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
26.12.2022	15:05:09,5	79,91	100,48	0,8	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
04.02.2023	14:51:51,3	80,53	102,43	1,0	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
07.02.2023	14:24:33,6	79,98	98,30	1,0	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
15.02.2023	23:58:18,0	79,52	94,85	1,3	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
25.02.2023	14:01:07,4	80,19	97,54	1,1	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
08.03.2022	02:05:19,6	78,47	99,75	0,8	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
31.03.2022	03:56:12,0	80,74	93,69	2,4	–	ACC
04.03.2023	07:52:49,0	81,71	92,62	2,5	–	ACC
30.03.2023	17:06:54,2	80,57	99,07	0,9	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
03.04.2023	23:10:05,1	78,63	109,13	1,3	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
07.04.2023	12:05:50,7	79,15	95,21	1,2	–	зарегистрировано только с/с SVZ ACC
17.09.2023	12:28:29,0	75,49	111,59	3,4	–	ACC

До установки сейсмической станции на арх. Северная Земля в пределах района исследования регистрировались землетрясения с магнитудами mb выше 3,0. После 2016 г. появилась возможность регистрировать землетрясения с магнитудами ML от 0,2. Сильнейшее землетрясение, приуроченное к континентальному склону, произошло 19.10.1924 г. с $M_{s\text{униф.}} = 5,6$ (рис. 9).

С момента открытия сейсмической станции SVZ в пределах арх. Северная Земля зарегистрировано 49 землетрясений, из которых 41 выявлены по данным только одной станции SVZ (табл. 7). Среди землетрясений, которые были зарегистрированы несколькими станциями, три землетрясения приурочены к континентальному склону и одно к шельфу Карского моря (рис. 9).

Непосредственно на п-ове Таймыр зарегистрировано 5 землетрясений, при этом два из них 14.03.2022 и 17.09.2023 гг. зарегистрированы только сейсмическими станциями ФИЦКИА УрО РАН; 4 из них произошли на границе между Поднебесием Таймыр (Бырранга) и Хатангским прогибом (рис. 9).

Западнее арх. Северная Земля расположен грабен Воронина, который характеризуется полным отсутствием зарегистрированных землетрясений, что является одной из особенностей в распределении эпицентров в пределах района исследования.

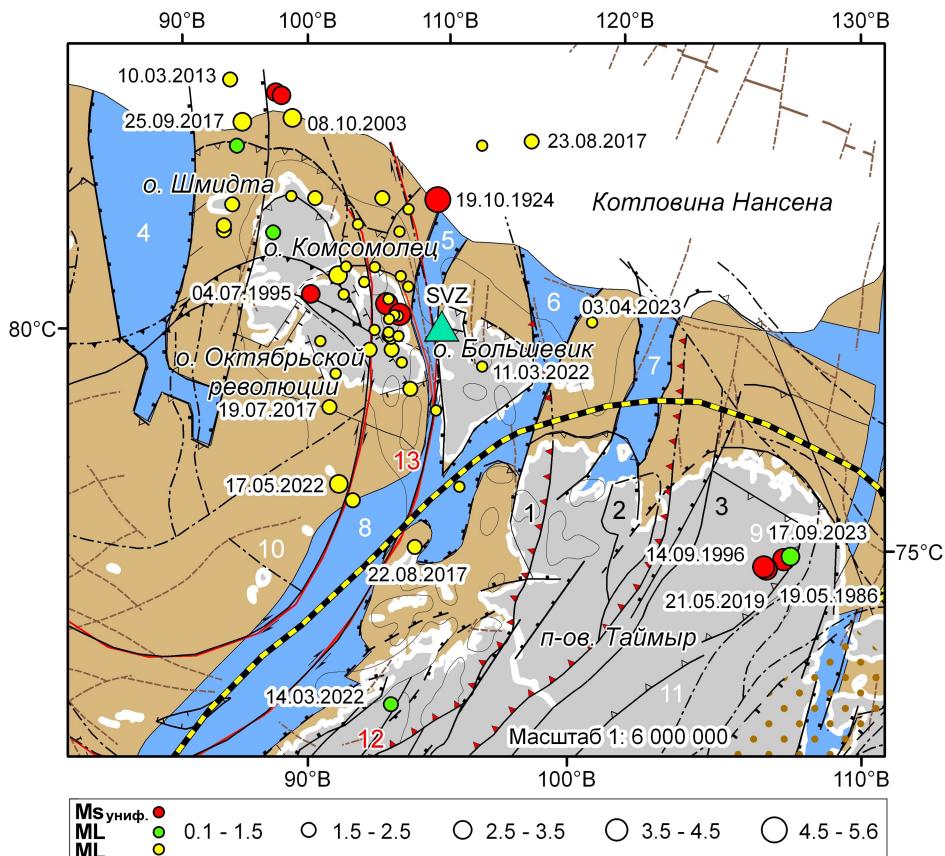


Рис. 9. Распределение эпицентров землетрясений в зоне VI на карте неотектонических структур и разломов по [Атлас..., 2004; Тектоническая карта..., 2019; Arctic..., 2011] (условные обозначения – см. рис. 5). Складчатые зоны: 1 – Северо-Таймырская; 2 – Центрально-Таймырская; 3 – Южно-Таймырская; Структуры: 4 – грабен Воронина; 5 – грабен Шокальского; 6 – грабен Вилькицкого; 7 – грабен Комсомольской правды; 8 – прогиб Харитона Лаптева; 9 – поднятие Таймыр (Бырранга); 10 – Центрально-Карское поднятие; 11 – Хатангский прогиб; 12 – Главный Таймырский надвиг; 13 – надвиговый фронт Большевик.

Большая часть эпицентров землетрясений ($N = 21$), зарегистрированных одной станцией, приурочено к южной части о. Октябрьской революции. В этой части острова располагаются крупные ледники, поэтому вполне вероятно, что надвиговые деформации с фронта Большевик вызывают деструкцию этих ледников. Три таких землетрясения зарегистрированы в районе самого северного, небольшого по размеру острова, архипелага – о. Шмидта (13.03.2017, 08.05.2017 и 02.05.2018). Часть эпицентров можно отнести к континентальному склону. Остальные эпицентры расположены в пределах района исследования без формирования групп, однако многие из них приурочены к разломам разного типа (рис. 9). На о. Большевик зарегистрировано малое количество событий, поэтому сложно вести их подробный анализ. Мы продолжаем накопление материала.

В зоне VI сейсмическая активность $A = 2877 \times 10^3 \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ на порядок отличается от предыдущих пяти зон. Во-первых, именно в этой зоне зарегистрировано самое сильное землетрясение с $M_{\text{ униф.}} = 5,6$. Во-вторых, каталог содержит наибольшее количество событий среди остальных зон. Это и определяет максимальное значение параметра A и характеризует арх. Северная Земля как наиболее сейсмически активный среди российских арктических архипелагов.

Значения теплового потока для архипелага варьируются в пределах $60\text{--}80 \text{ мВт}/\text{м}^2$, для континентальной части – в пределах $50\text{--}70 \text{ мВт}/\text{м}^2$ (рис. 2).

Вывод по зоне VI. Северо-Таймырская складчатая зона отличается повышенной сейсмотектонической активностью, в которой произошло достаточно большое количество землетрясений. События приурочены к крупнейшим сдвигово-надвиговым зонам южного дугообразного обрамления Карской плиты и к кромке борта котловины Нансена. Значения теплового потока характеризуются как повышенные.

Заключение

Созданный сводный уточнённый каталог землетрясений с начала XX века по 2023 г. содержит сведения о 142 сейсмических событиях (табл. 2–7) и может служить основой для последующих исследований, связанных с оценкой потенциальных природно-техногенных рисков, обеспечения безопасной эксплуатации инфраструктуры СМП, разработок промышленных систем и объектов при освоении крупных месторождений в западном секторе Российской Арктики.

Выявляется корреляция сейсмичности с аномалиями магнитного и гравитационного поля при локации эпицентров землетрясений в зонах тектонических нарушений или на контактах крупных блоков вдоль тектонических структур.

Сопоставление тектонических обстановок при сейсмологическом мониторинге трассы Северного морского пути в арктическом секторе Российской Федерации позволило выделить зону повышенной сейсмической активности, $A = 2877 \times 10^3 \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$. Это Северо-Таймырская складчатая зона (VI), в которой рассмотрено 59 землетрясений. События приурочены к крупнейшим сдвигово-надвиговым зонам южного дугообразного обрамления Карской плиты и к кромке борта котловины Нансена. Для VI зоны характерны повышенные значения теплового потока.

Северо-восточная зона (V) вдоль Баренцево-Карского борта котловины Нансена на северо-восток от арх. Земля Франца-Иосифа характеризуется сейсмической активностью $A = 214 \times 10^3 \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ с большим числом землетрясений. 29 землетрясений попадают в рифтовую зону, часть приурочены к разломам. Для V зоны характерны повышенные значения теплового потока.

В зоне на арх. Новая Земля (III) значение сейсмической активности составляет $A = 188 \times 10^3 \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$, где зафиксировано 17 сейсмических событий, которые приурочены к субмеридиональным разломам.

В Южно-Карском бассейне (IV) зарегистрировано всего 6 событий. Землетрясение 08.10.1963 г. с $M_{\text{униф.}} = 4,7$ определяет сейсмическую активность со значением $A = 77 \times 10^3 \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$. Землетрясения зафиксированы вдоль разрывных нарушений, в зоне дислокаций Северо-Таймырской зоны поднятий и в рифтовом грабене чехла Западно-Сибирской платформы. Значения теплового потока характеризуются как повышенные. Значение A в данной зоне сопоставимо с сейсмической активностью зоны Белого моря с его прибрежной территорией (I), $A = 50 \times 10^3 \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$, где произошло 25 сейсмических событий. Из них 15 событий в покровно-надвиговых структурах Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса. Часть событий примыкает к зонам рифейских палеорифтов, в области сдвиговых деформаций под воздействием раскрытия Колвицкого и Кандалакшского грабенов. Для этой зоны отмечается антибатная связь, с относительно пониженным тепловым потоком.

Юго-восточная часть Баренцева моря (II) характеризуется наименьшей сейсмической активностью со значением $A = 5 \times 10^3 \text{ Дж}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$, где землетрясения редки. В этой зоне рассмотрено 6 низкомагнитудных землетрясений, приуроченных к зоне разломов в области сочленения блоков Печорской и Баренцевоморской плит. Значения теплового потока в этих зонах определяются как повышенные, что даёт нам право предположить о наличии в этих зонах проявления антибатной зависимости.

Таким образом, характер проявления современных геодинамических процессов представлен сейсмической обстановкой в совокупности с пространственным распределением значений теплового потока. Данные исследования являются важной информацией для оценки сейсмической ситуации вдоль трассы Севморпути в западном секторе Российской Арктики.

Благодарности. Исследования выполнены на базе УНУ «Архангельская сейсмическая сеть» при финансовой поддержке темы НИР, включённой в государственное задание ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН и проекта молодых учёных ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН № 124062700063-3 «Сейсмичность арктических и приарктических территорий Архангельской области».

Список литературы

- Антоновская Г. Н., Конечная Я. В. и Басакина И. М. Влияние срединно-океанических хребтов на сейсмичность архипелага Новая Земля // Геотектоника. — 2023. — № 6. — С. 78–93. — <https://doi.org/10.31857/s0016853x23060036>.
- 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. — <https://doi.org/10.5800/gt-2022-13-2-0587>.
- Артюшков Е. В. Физическая тектоника. — Москва : Наука, 1993. — 456 с. — EDN: RVEAQV.
- Асминг В. Э. Создание программного комплекса для автоматизации детектирования, локации и интерпретации сейсмических событий и его использование для изучения сейсмичности Северо-западного региона. — Москва : ИДГ РАН, 2004. — 126 с.
- Ассиновская Б. А. 2.2 Инструментальные данные о землетрясениях Карельского региона // Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / под ред. Н. В. Шарова. — Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2004. — С. 213–229.
- Атлас «Геология и полезные ископаемые шельфов России» / под ред. М. Н. Алексеева. — Москва : Научный мир, 2004. — 108 с.
- Божко Н. А., Прусакова Н. А. и Громцев К. В. Особенности тектонического строения Лапландско-Беломорского гранулито-гнейсового пояса и перспективы его коренной алмазоносности // Отечественная геология. — 2022. — № 6. — С. 45–64. — <https://doi.org/10.47765/0869-7175-2021-10031>.
- Гравиметрическая карта России (масштаб: 1:5000000) / под ред. О. В. Петров, А. Ф. Морозов, А. В. Липилин и др. — ВСЕГЕИ, 2004. — URL: <https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/grav5000/> (дата обр. 15.04.2024).
- Заболотских Е. В., Хворостовский К. С., Животовская М. А. и др. Спутниковое микроволновое зондирование морского льда Арктики. Обзор // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2023. — Т. 20, № 1. — С. 9–34. — <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-1-9-34>.
- Зархицзе Д. В., Красножен А. С., Шкарабо С. И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Северо-Карельско-Баренцевоморская. Лист S-39,40 – прол. Маточкин Шар. Объяснительная записка. — СПб. : ВСЕГЕИ, 2021. — 333 с.
- Информационный аналитико-статистический центр РОСМОРРЕЧФЛОТА. Акватория Северного морского пути. — URL: http://www.nsra.ru/ru/ofitsialnaya_informatsiya/granici_smp.html (дата обр. 15.04.2024).
- Козловский В. М., Травин В. В., Саватенков В. М. и др. Термобарометрия палеопротерозойских метаморфических событий центральной части Беломорского подвижного пояса, Северная Карелия // Петрология. — 2020. — Т. 28, № 2. — С. 184–209. — <https://doi.org/10.31857/S0869590320010033>.
- Колодяжный С. Ю., Балуев А. С. и Зыков Д. С. Структура и эволюция северо-запада Беломорско-Северодвинской зоны сдвига в позднем протерозое и фанерозое (Восточно-Европейская платформа) // Геотектоника. — 2019. — № 1. — С. 62–86. — <https://doi.org/10.31857/s0016-853x2019162-86>.
- Кораго Е. А., Ковалева Г. Н., Щеколдин Р. А. и др. Геологическое строение архипелага Новая Земля (запад российской Арктики) и особенности тектоники евразийской Арктики // Геотектоника. — 2022. — № 2. — С. 21–57. — <https://doi.org/10.31857/S0016853X22020035>.
- Кочарян Г. Г. Геомеханика разломов. — Москва : ГЕОС, 2016. — 424 с.
- Мартышко П. С., Ладовский И. В., Федорова Н. В. и др. Теория и методы комплексной интерпретации геофизических данных. — Екатеринбург : УрО РАН, 2016. — 94 с.
- Метелкин Д. В., Верниковский В. А. и Матушкин Н. Ю. Региональная геология России (краткий курс лекций). Учебное пособие для студентов геологических специальностей. — Новосибирск : Новосибирский государственный университет, 2010. — 79 с.
- Морозов А. Н. и Ваганова Н. В. Годографы сейсмических волн для Севера Русской плиты по данным Архангельской сейсмической сети // Разведка и охрана недр. — 2011. — № 12. — С. 48–51. — EDN: OKMTSB.
- Морозов А. Н. и Ваганова Н. В. Годографы региональных волн Р и S для районов спрединговых хребтов Евро-Арктического региона // Вулканология и сейсмология. — 2017. — № 2. — С. 59–67. — <https://doi.org/10.7868/s0203030617020055>.

- Морозов А. Н. и Ваганова Н. В. Сейсмичность западного сектора Российской Арктики. — Москва : ИФЗ РАН, 2024. — 240 с.
- Морозов А. Н., Ваганова Н. В., Асминг В. Э. и др. Шкала ML для западной части Евразийской Арктики // Российский сейсмологический журнал. — 2020. — Т. 2, № 4. — С. 63–68. — <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.06>.
- Морозов А. Н., Ваганова Н. В., Асминг В. Э. и др. Сейсмичность Беломорского региона // Сейсмические приборы. — 2022а. — Т. 58, № 1. — С. 5–28. — <https://doi.org/10.21455/si2022.1-1>.
- Морозов А. Н., Ваганова Н. В., Асминг В. Э. и др. Сейсмичность западного сектора Российской Арктики // Физика Земли. — 2023. — № 2. — С. 115–148. — <https://doi.org/10.31857/S0002333723020096>.
- Морозов А. Н., Ваганова Н. В., Михайлова Я. А. и др. Унификация магнитуд современных землетрясений Евразийской Арктики // Сейсмические приборы. — 2022б. — Т. 58, № 1. — С. 67–80. — <https://doi.org/10.21455/si2022.1-4>.
- Никонов А. А. 2.1 Исторические землетрясения // Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / под ред. Н. В. Шарова. — Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2004. — С. 192–213.
- Панасенко Г. Д. Землетрясения Фенноскандии в 1951–1970 гг. Каталог. — Москва : МГК АН СССР, 1977. — 111 с.
- Петрова Н. В. и Курова А. Д. Сопоставление систем классификации землетрясений в локальных магнитудах ML в некоторых регионах Северной Евразии // Российский сейсмологический журнал. — 2023. — Т. 5, № 2. — С. 61–76. — <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.05>.
- Репина И. А. и Иванов В. В. Применение методов дистанционного зондирования в исследовании динамики ледового покрова и современной климатической изменчивости Арктики // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — Т. 9, № 5. — С. 89–103.
- Тектоническая карта Арктики / под ред. О. В. Петрова и М. Пубелье. — СПб. : ВСЕГЕИ, 2019. — 72 с.
- Хайн В. Е. и Ломизе М. Г. Геотектоника с основами геодинамики. — Москва : КДУ, 2005. — 560 с.
- Хуторской М. Д., Антоновская Г. Н., Басакина И. М. и др. Сейсмичность, тепловой поток и тектоника Западно-Арктического бассейна // Мониторинг. Наука и технологии. — 2015. — 3(24). — С. 6–15. — EDN: [ULRJ1J](#).
- Хуторской М. Д., Антоновская Г. Н., Басакина И. М. и др. Сейсмичность и тепловой поток в обрамлении Восточно-Европейской платформы // Вулканология и сейсмология. — 2022. — № 2. — С. 74–92. — <https://doi.org/10.31857/S0203030622020043>.
- Хуторской М. Д., Ахмедзянов В. Р., Ермаков А. В. и др. Геотермия арктических морей. — Москва : ГЕОС, 2013. — 232 с. — EDN: [USDQHK](#).
- Шаров Н. В. и Журавлев В. А. Строение земной коры Белого моря и прилегающих территорий // Арктика: экология и экономика. — 2019. — 3(35). — С. 62–72. — <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-62-72>.
- Antonovskaya G., Konechnaya Y., Morozova E., et al. Potential of the Arkhangelsk seismic network for European Arctic monitoring // Earthquake Science. — 2024а. — Vol. 37, no. 5. — P. 434–444. — <https://doi.org/10.1016/j.eqs.2024.06.005>.
- Antonovskaya G. N., Basakina I. M., Vaganova N. V., et al. Spatiotemporal Relationship between Arctic Mid-Ocean Ridge System and Intraplate Seismicity of the European Arctic // Seismological Research Letters. — 2021. — Vol. 92, no. 5. — P. 2876–2890. — <https://doi.org/10.1785/0220210024>.
- Antonovskaya G. N., Kapustian N. K., Konechnaya Ya. V., et al. Glacial and seismic events investigation from a single-station record at Severnaya Zemlya archipelago (Arctic region) // Journal of Seismology. — 2024б. — Vol. 28, no. 3. — P. 615–633. — <https://doi.org/10.1007/s10950-024-10208-5>.
- Arctic Petroleum Geology / ed. by A. M. Spencer, A. F. Embry, D. L. Gautier, et al. — London : Geological Society, 2011. — 568 p. — <https://doi.org/10.1144/M35>.
- Avetisov G. P. Seismically active zones of the Arctic. — St. Petersburg : VNII Okeangeologia, 1996. — 185 p.
- Gaina C. and the CAMP-GM group. Gravity anomaly map of the Arctic. Scale 1:5000000. — URL: <https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/inter-proj/mag-arctic5000/> (visited on 04/15/2024).
- GHFDB. IHFC Viewer Global Heat Flow Database. — 2021. — URL: <https://ihfc-iugg.org/viewer/> (visited on 04/15/2024).
- Hutchinson M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // Journal of Hydrology. — 1989. — Vol. 106, no. 3/4. — P. 211–232. — [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5).
- Hutchinson M. F., Xu T. and Stein J. A. Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure // Geomorphometry 2011: Five days of Digital Terrain Analysis. — Redlands, CA, USA : ISG, 2011. — P. 19–22.
- International Seismological Centre. ISC locations: 1964 to present. — URL: <http://www.isc.ac.uk/> (visited on 04/15/2024).

- Kim W.-Y. and Ottemöller L. Regional Pn Body-Wave Magnitude Scale mb(Pn) for Earthquakes Along the Northern Mid-Atlantic Ridge // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2017. — Vol. 122, no. 12. — <https://doi.org/10.1002/2017jb014639>.
- Koulakov I. Yu., Gaina C., Dobretsov N. L., et al. Plate reconstructions in the Arctic region based on joint analysis of gravity, magnetic, and seismic anomalies // Russian Geology and Geophysics. — 2013. — Vol. 54, no. 8. — P. 859–873. — <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.007>.
- Kremenetskaya E., Asming V. and Ringdal F. Seismic Location Calibration of the European Arctic // Pure and Applied Geophysics. — 2001. — Vol. 158, no. 1. — P. 117–128. — <https://doi.org/10.1007/pl00001151>.
- Morozov A. N., Asming V. E., Vaganova N. V., et al. Seismicity of the Novaya Zemlya archipelago: relocated event catalog from 1974 to 2014 // Journal of Seismology. — 2017. — Vol. 21, no. 6. — P. 1439–1466. — <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9676-y>.
- Morozov A. N., Vaganova N. V., Asming V. E., et al. The instrumental seismicity of the Barents and Kara sea region: relocated event catalog from early twentieth century to 1989 // Journal of Seismology. — 2018. — Vol. 22, no. 5. — P. 1171–1209. — <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9760-y>.
- Morozov A. N., Vaganova N. V., Asming V. E., et al. The Present-Day Seismicity of the White Sea Region // Journal of Volcanology and Seismology. — 2019. — Vol. 13, no. 1. — P. 27–41. — <https://doi.org/10.1134/S0742046319010068>.
- Rathje E. M. and Adams B. J. The Role of Remote Sensing in Earthquake Science and Engineering: Opportunities and Challenges // Earthquake Spectra. — 2008. — Vol. 24, no. 2. — P. 471–492. — <https://doi.org/10.1193/1.2923922>.

ANALYSIS OF SEISMICITY ALONG THE NORTHERN SEA ROUTE IN THE WESTERN SECTOR OF THE RUSSIAN ARCTIC

E. V. Shakhova^{*,1}, I. M. Basakina¹, E. R. Morozova¹,
Y. V. Konechnaya^{1,2}, and Y. A. Mikhailova¹

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

²Federal Research Center “Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”, Obninsk, Kaluga Region, Russia

**Correspondence to: Evgeniya Shakhova, shahovaev@yandex.ru

The article analyzes the seismic situation along the Northern Sea Route, located in the western Sector of the Russian Arctic. We compiled a research area seismic catalog from the beginning of the 20th century to 2023. According to the results of the spatial distribution of earthquakes, 6 zones have been identified, characterized by varying degrees of seismic activity. The greatest seismic activity was recorded in the area of the Severnaya Zemlya archipelago and the Taimyr Peninsula, the least in the southeastern part of the Barents Sea. In each selected zone, a comparison of seismicity with available geophysical data (heat flow, tectonic situation, gravio- and magnetic anomalies) is given. The results can serve as a basis for subsequent studies related to the assessment of potential natural and man-made risks of the Northern Sea Route.

Received: August 5, 2024

Accepted: June 26, 2025

Published: October 30, 2025

Citation: Shakhova E. V., Basakina I. M., Morozova E. R., Konechnaya Y. V., and Mikhailova Y. A. (2025), Analysis of Seismicity Along the Northern Sea Route in the Western Sector of the Russian Arctic, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES5019, <https://doi.org/10.2205/2025ES001032>, EDN: HQGGNK

References

- Antonovskaya G. N., Basakina I. M., Vaganova N. V., et al. Spatiotemporal Relationship between Arctic Mid-Ocean Ridge System and Intraplate Seismicity of the European Arctic // *Seismological Research Letters*. — 2021. — Vol. 92, no. 5. — P. 2876–2890. — <https://doi.org/10.1785/0220210024>.
- Antonovskaya G. N., Kapustian N. K., Konechnaya Ya. V., et al. Glacial and seismic events investigation from a single-station record at Severnaya Zemlya archipelago (Arctic region) // *Journal of Seismology*. — 2024a. — Vol. 28, no. 3. — P. 615–633. — <https://doi.org/10.1007/s10950-024-10208-5>.
- Antonovskaya G. N., Konechnaya Y., Morozova E., et al. Potential of the Arkhangelsk seismic network for European Arctic monitoring // *Earthquake Science*. — 2024b. — Vol. 37, no. 5. — P. 434–444. — <https://doi.org/10.1016/j.eqs.2024.06.005>.
- Antonovskaya G. N., Konechnaya Ya. V. and Basakina I. M. The Influence of Mid-Oceanic Ridges on the Seismicity of the Novaya Zemlya Archipelago // *Geotectonics*. — 2023. — Vol. 57, no. 6. — P. 759–773. — <https://doi.org/10.1134/s0016852123060031>.
- Antonovskaya G. N., Konechnaya Ya. V., Vaganova N. V., et al. Contribution of the Unique Scientific Facilities «Arkhangelsk Seismic Network» to the Russian Arctic Seismicity Study // *Geodynamics & Tectonophysics*. — 2022. — Vol. 13, no. 2. — <https://doi.org/10.5800/gt-2022-13-2-0587>. — (In Russian).
- Arctic Petroleum Geology / ed. by A. M. Spencer, A. F. Embry, D. L. Gautier, et al. — London : Geological Society, 2011. — 568 p. — <https://doi.org/10.1144/M35>.
- Artyushkov E. V. Physical Tectonics. — Moscow : Nauka, 1993. — 456 p. — EDN: RVEAQV ; (in Russian).
- Asming V. E. Creation of a Software Complex for Automation of Detection, Location and Interpretation of Seismic Events and Its Use for Studying the Seismicity of the Northwestern Region. — Moscow : IDG RAS, 2004. — 126 p. — (In Russian).

- Assinovskaya B. A. 2.2 Instrumental Data on Earthquakes of the Karelian Region // Deep Structure and Seismicity of the Karelian Region and Its Margins / ed. by N. V. Sharov. — Petrozavodsk : KarSC RAS, 2004. — P. 213–229. — (In Russian).
- Atlas «Geology and Mineral Resources of the Shelves of Russia» / ed. by M. N. Alekseev. — Moscow : Nauchnyi Mir, 2004. — 108 p. — (In Russian).
- Avetisov G. P. Seismically active zones of the Arctic. — St. Petersburg : VNIIookeangeologia, 1996. — 185 p.
- Bozhko N. A., Prusakova N. A. and Gromtsev K. V. Features of the tectonic structure of the Lapland-White Sea granulite-gneiss belt and prospects of its native diamond bearing // Otechestvennaya Geologiya. — 2022. — No. 6. — P. 45–64. — <https://doi.org/10.47765/0869-7175-2021-10031>. — (In Russian).
- Gaina C. and the CAMP-GM group. Gravity anomaly map of the Arctic. Scale 1:5000000. — URL: <https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/inter-proj/mag-arctic5000/> (visited on 04/15/2024).
- GHFDB. IHFC Viewer Global Heat Flow Database. — 2021. — URL: <https://ihfc-iugg.org/viewer/> (visited on 04/15/2024).
- Gravimetric Map of Russia (Scale: 1:5000000) / ed. by O. V. Petrov, A. F. Morozov, A. V. Lipilin, et al. — 2004. — URL: <https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/grav5000/> (visited on 04/15/2024); (in Russian).
- Hutchinson M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // Journal of Hydrology. — 1989. — Vol. 106, no. 3/4. — P. 211–232. — [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5).
- Hutchinson M. F., Xu T. and Stein J. A. Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure // Geomorphometry 2011: Five days of Digital Terrain Analysis. — Redlands, CA, USA : ISG, 2011. — P. 19–22.
- International Seismological Centre. ISC locations: 1964 to present. — URL: <http://www.isc.ac.uk/> (visited on 04/15/2024).
- Khain V. E. and Lomize M. G. Geotectonics with Fundamentals of Geodynamics. — Moscow : KDU, 2005. — 560 p. — (In Russian).
- Khutorskoy M. D., Akhmedzyanov V. R., Ermakov A. V., et al. Geothermics of the Arctic Seas. — Moscow : GEOS, 2013. — 232 p. — EDN: [USDQHK](#); (in Russian).
- Khutorskoy M. D., Antonovskaya G. N., Basakina I. M., et al. Seismicity, Heat Flow and Tectonics of the West Arctic Basin // Monitoring. Science & Technologies. — 2015. — 3(24). — P. 6–15. — EDN: [ULRJLJ](#); (in Russian).
- Khutorskoy M. D., Antonovskaya G. N., Basakina I. M., et al. Seismicity and Heat Flow in the Frame of Eastern European Platform // Vulkanologiya i Seismologiya. — 2022. — No. 2. — P. 74–92. — <https://doi.org/10.31857/S0203030622020043>. — (In Russian).
- Kim W.-Y. and Ottemöller L. Regional Pn Body-Wave Magnitude Scale mb(Pn) for Earthquakes Along the Northern Mid-Atlantic Ridge // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2017. — Vol. 122, no. 12. — <https://doi.org/10.1002/2017jb014639>.
- Kocharyan G. G. Geomechanics of Faults. — Moscow : GEOS, 2016. — 424 p. — (In Russian).
- Kolodyazhny S. Yu., Baluyev A. S. and Zykov D. S. Structure and Evolution of the Belomorian-Severodvinsk Shear Zone in the Late Proterozoic and Phanerozoic, East European Platform // Geotectonics. — 2019. — Vol. 53, no. 1. — P. 60–83. — <https://doi.org/10.1134/s0016852119010047>.
- Korago E. A., Kovaleva G. N., Shchekoldin R. A., et al. Geological Structure of the Novaya Zemlya Archipelago (West Russian Arctic) and Peculiarities of the Tectonics of the Eurasian Arctic // Geotectonics. — 2022. — Vol. 56, no. 2. — P. 123–156. — <https://doi.org/10.1134/S0016852122020030>.
- Koulakov I. Yu., Gaina C., Dobretsov N. L., et al. Plate reconstructions in the Arctic region based on joint analysis of gravity, magnetic, and seismic anomalies // Russian Geology and Geophysics. — 2013. — Vol. 54, no. 8. — P. 859–873. — <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.007>.
- Kozlovskii V. M., Travin V. V., Savatenkov V. M., et al. Thermobarometry of Paleoproterozoic Metamorphic Events in the Central Belomorian Mobile Belt, Northern Karelia, Russia // Petrology. — 2020. — Vol. 28, no. 2. — P. 183–206. — <https://doi.org/10.1134/S0869591120010038>.
- Kremenetskaya E., Asming V. and Ringdal F. Seismic Location Calibration of the European Arctic // Pure and Applied Geophysics. — 2001. — Vol. 158, no. 1. — P. 117–128. — <https://doi.org/10.1007/pl00001151>.
- Martyshko P. S., Ladovsky I. V., Fedorova N. V., et al. Theory and Methods of Complex Interpretation of Geophysical Data. — Ekaterinburg : UB RAS, 2016. — 94 p. — (In Russian).
- Metelkin D. V., Vernikovsky V. A. and Matushkin N. Yu. Regional Geology of Russia (Short Course of Lectures). Textbook for Students of Geological Specialties. — Novosibirsk : Novosibirsk State University, 2010. — 79 p. — (In Russian).
- Morozov A. N., Asming V. E., Vaganova N. V., et al. Seismicity of the Novaya Zemlya archipelago: relocated event catalog from 1974 to 2014 // Journal of Seismology. — 2017. — Vol. 21, no. 6. — P. 1439–1466. — <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9676-y>.

- Morozov A. N. and Vaganova N. V. Locuses Seismic Waves for the North of Russian Plate According to the Arkhangelsk Seismic Network // Prospect and protection of mineral resources. — 2011. — No. 12. — P. 48–51. — EDN: OKMTSB ; (in Russian).
- Morozov A. N. and Vaganova N. V. The travel times of regional P and S for spreading ridges in the European Arctic // Journal of Volcanology and Seismology. — 2017. — Vol. 11, no. 2. — P. 156–163. — <https://doi.org/10.1134/s0742046317020051>.
- Morozov A. N. and Vaganova N. V. Seismicity of the Western Sector of the Russian Arctic. — Moscow : IFZ RAN, 2024. — 240 p. — (In Russian).
- Morozov A. N., Vaganova N. V., Asming V. E., et al. The instrumental seismicity of the Barents and Kara sea region: relocated event catalog from early twentieth century to 1989 // Journal of Seismology. — 2018. — Vol. 22, no. 5. — P. 1171–1209. — <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9760-y>.
- Morozov A. N., Vaganova N. V., Asming V. E., et al. The Present-Day Seismicity of the White Sea Region // Journal of Volcanology and Seismology. — 2019. — Vol. 13, no. 1. — P. 27–41. — <https://doi.org/10.1134/S0742046319010068>.
- Morozov A. N., Vaganova N. V., Asming V. E., et al. The ML scale in western Eurasian Arctic // Russian Journal of Seismology. — 2020. — Vol. 2, no. 4. — P. 63–68. — <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.06>. — (In Russian).
- Morozov A. N., Vaganova N. V., Asming V. E., et al. Seismicity of the White Sea Region // Seismic Instruments. — 2022a. — Vol. 58, no. 1. — P. 311–329. — <https://doi.org/10.3103/S0747923922030112>.
- Morozov A. N., Vaganova N. V., Asming V. E., et al. Seismicity of the Western Sector of the Russian Arctic // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2023. — Vol. 59, no. 2. — P. 209–241. — <https://doi.org/10.1134/s106935132302009x>.
- Morozov A. N., Vaganova N. V., Mikhailova Ya. A., et al. Unification of Magnitudes for Modern Earthquakes in the Eurasian Arctic Region // Seismic Instruments. — 2022b. — Vol. 58, no. 4. — P. 389–397. — <https://doi.org/10.3103/s0747923922040077>.
- Nikonov A. A. 2.1 Historical Earthquakes // Deep Structure and Seismicity of the Karelian Region and Its Margins / ed. by N. V. Sharov. — Petrozavodsk : KarSC RAS, 2004. — P. 192–213. — (In Russian).
- Panasenko G. D. Fennoscandian Earthquakes in 1951–1970 (Catalogue). — Moscow : MGK AN SSSR, 1977. — 111 p. — (In Russian).
- Petrova N. V. and Kurova A. D. Comparison of earthquake classification systems in local magnitudes ML in some regions of Northern Eurasia // Russian Journal of Seismology. — 2023. — Vol. 5, no. 2. — P. 61–76. — <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.05>. — (In Russian).
- Rathje E. M. and Adams B. J. The Role of Remote Sensing in Earthquake Science and Engineering: Opportunities and Challenges // Earthquake Spectra. — 2008. — Vol. 24, no. 2. — P. 471–492. — <https://doi.org/10.1193/1.2923922>.
- Repina I. A. and Ivanov V. V. Remote sensing in ice sea dynamic and modern Arctic climate investigation // Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. — 2012. — Vol. 9, no. 5. — P. 89–103. — (In Russian).
- Sharov N. V. and Zhuravlev V. A. The crustal structure of the White Sea and adjacent territories // Arctic: Ecology and Economy. — 2019. — 3(35). — P. 62–72. — <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-62-72>. — (In Russian).
- Tectonic Map of the Arctic / ed. by O. V. Petrov and M. Pubelier. — SPb. : VSEGEI, 2019. — 72 p. — (In Russian).
- The Information Analytical and Statistical Center of the ROSMORRECHFLOT. The water area of the Northern Sea Route. — URL: http://www.nsra.ru/ru/ofitsialnaya_informatsiya/granici_smp.html (visited on 04/15/2024) ; (in Russian).
- Zabolotskikh E. V., Khvorostovsky K. S., Zhivotovskaya M. A., et al. Satellite microwave remote sensing of the Arctic sea ice. Review // Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. — 2023. — Vol. 20, no. 1. — P. 9–34. — <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-1-9-34>. — (In Russian).
- Zarkhidze D. V., Krasnozhen A. S., Shkarubo S. I., et al. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000. Third Generation. North Kara-Barents Sea Series. Sheet S-39,40 - Matochkin Shar Strait. Explanatory Note. — SPb. : VSEGEI, 2021. — 333 p. — (In Russian).