

УДК 550:24–550.34

## ВЛИЯНИЕ СРЕДИННО-ОКЕАНИЧЕСКИХ ХРЕБТОВ НА СЕЙСМИЧНОСТЬ АРХИПЕЛАГА НОВАЯ ЗЕМЛЯ

© 2023 г. Г. Н. Антоновская<sup>1</sup>, \*, Я. В. Конечная<sup>1, 2</sup>, И. М. Басакина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики  
им. акад. Н.П. Лаврова УрО РАН, д. 20, пр. Никольский, 163020 Архангельск, Архангельская обл., Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба РАН”,  
д. 189, пр. Ленина, 249034 Обнинск, Калужская обл., Россия

\*e-mail: [essm.ras@gmail.com](mailto:essm.ras@gmail.com)

Поступила в редакцию 25.07.2023 г.

После доработки 02.10.2023 г.

Принята к публикации 16.10.2023 г.

В статье рассмотрено влияние срединно-океанических хребтов (СОХ), включающих хребет Гаккеля и геологическую систему хребет Книповича–трог Лены, на сейсмичность района архипелага Новая Земля за 1980–2022 гг. Для каждого исследованного геологического элемента составлены сейсмические каталоги с единой унифицированной магнитудой  $m_{ISC}$  для равнозначного сопоставления информации, рассчитана годовая сейсмическая энергия и построены графики распределения выделившейся сейсмической энергии по годам. Выполнено аналитическое моделирование на основе модели Эльзассера, описывающей процесс переноса локальных напряжений в жесткой упругой литосфере, подстилаемой вязкой астеносферой, и проведены количественные расчеты распространения возмущений от СОХ. Временные интервалы, через которые возмущения от СОХ достигают архипелага Новая Земля, составляют 1–2 года для геологической системы хребет Книповича–трог Лены и 3–5 лет для хребта Гаккеля. Максимальное совместное влияние на уровень сейсмической активности различных геолого-тектонических структур СОХ может достигать 40–60% от прикладываемых значений возмущений, что является достаточным условием для изменения сейсмической активности Новоземельского орогена. Выделены наиболее геодинамически активные структуры и зоны концентрации тектонических напряжений.

**Ключевые слова:** архипелаг Новая Земля, сейсмичность, срединно-океанические хребты (СОХ), тектонические процессы, передача возмущений

**DOI:** 10.31857/S0016853X23060036, **EDN:** GCCHVX

### ВВЕДЕНИЕ

Установка сейсмических станций Федеральным исследовательским центром комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук (ФИЦКИА УрО РАН, г. Архангельск, Архангельская обл., Россия) в Баренцево–Карском регионе позволила получить новые сведения о сейсмичности этого региона. На основе полученных нами данных была показана взаимосвязь землетрясений между срединно-океаническим хребтом (включающего хребты Мона, Книповича, Гаккеля и трог Лены) с платформенными (шельфовыми) территориями и сводово-глыбовыми орогенами [34].

На сейсмичность Баренцево–Карского региона и северную окраину Восточно-Европейской платформы (ВЕП) оказывает влияние совместное действие срединно-океанических хребтов (СОХ), помимо таких факторов, как сброс частичных напряжений, создаваемых литосферными плитами;

разгрузка от после-ледникового оледенения; индуцированная сейсмичность и т.д.

Выделены временные интервалы, через которые возмущения от СОХ, создаваемые силами отталкивания, могут достигать района архипелага Новая Земля и северной окраины ВЕП [34].

Срединно-океанические хребты Гаккеля, Книповича и Мона характеризуются как хребты с ультрамедленным спредингом. Именно эти хребты могут оказывать максимальное влияние на проявление сейсмичности в районе арх. Новая Земля и северной окраины Восточно-Европейской платформы [5, 13, 14].

В районе хребта Гаккеля выявлены наиболее низкие скорости спрединга при изменяющейся вдоль оси хребта температуре мантии и кинематике спрединга. На участке центрального магматического сегмента хребта Гаккеля спрединг наиболее медленный. В его пределах растяжение идет в “холодном” режиме и на поверхность экспониру-

ются породы мантии, толщина коры минимальна. При уменьшении эффективных скоростей спрединга и температуры подстилающей мантии магматическая активность все сильнее фокусируется в районе магматических сегментов с образованием все более крупных вулканических построек [5, 13].

Для хребта Книповича основными факторами являются [14]:

- формирование транзитной зоны между хребтами Гаккеля и Мона в условиях взаимодействия сдвиговых и раздвиговых напряжений и многочисленных перестроек спрединга;
- неортогональность спрединга;
- близость континентальной литосферы Баренцева моря и арх. Шпицбергена.

Для хребта Мона выявлен косой спрединг в условиях мощной и относительно холодной литосферы и узкой стабильной рифтовой зоны [5].

В работах [20, 51] убедительно была показана тесная связь временной изменчивости сейсмической активности Срединно-Атлантического хребта с Фенноскандией и Центральной и Восточной частями Северо-Американской платформы, что послужило основанием для проведенного нами исследования.

Мы выполнили обобщение сведений о сейсмичности Баренцево-Карского региона и сопредельных территориях за 1980–2019 гг. [34]. С 2020 по 2022 гг. включительно Архангельской сейсмической сетью ФИЦКИА УрО РАН (г. Архангельск, Архангельская обл., Россия) в районе арх. Новая Земля было зарегистрировано 13 землетрясений. Анализ проявления сейсмичности на архипелаге Новая Земля определил необходимость установки дополнительных сейсмических станции в этом регионе, что и было сделано в 2022 г.

Целью статьи является обобщение данных о сейсмичности арх. Новая Земля с уточнением связи на основе полученных данных с глобальными тектоническими процессами, происходящими под воздействием срединно-океанических хребтов.

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Архипелаг Новая Земля имеет дуговидную форму, простирается в субмеридиональном направлении на ~900 км, его средняя ширина составляет ~100 км, 1/4 часть площади архипелага покрыта льдом. Архипелаг находится в центральной части Баренцево-Карского региона в зоне активных тектонических процессов, является продолжением Уральской горной системы [19] (рис. 1).

Складчатый пояс арх. Новая Земля сформировался в результате раннекайнозойских (поздний триас–ранняя юра) тектонических движений, обусловленных предполагаемым столкновением Ба-

ренцево-Сибирской и Западно-Сибирской плит, при этом напряжение направлено с востока–юго-востока на запад–северо-запад, о чем свидетельствуют надвиги и обратная складчатость на западном склоне арх. Новая Земля [11].

Регион подвергался воздействию нескольких геодинамических обстановок. В настоящую геологическую эпоху кайнозой Пайхой–Новоземельская складчатая область представляется элементом мозаики среди разнородных структурных элементов – обломков континентов, островных дуг, образования ложа океанов и их окраинных морей. Отметим некоторые особенности строения этого региона. Новоземельская микроплита со складчатыми системами Тиманским кряжем, Пайхой–Новоземельским орогеном окружены древними Свальбардской (или Баренцевской), Тимано-Печорской и Западно-Сибирской плитами.

На границе Баренцевской плиты и Новоземельского складчатого сооружения расположена Предновоземельская структурная зона – зона надвигов и краевых поднятий. Форма Пайхой–Новоземельской складчатости дугообразная, складчатые и дизъюнктивные структуры огибают впадину [11].

Фундамент архипелага Новая Земля разделен Байдарацким разломом на две части:

- с севера унаследован мезопротерозойский фундамент Баренцевоморской плиты;
- на юге часть неопротерозойского фундамента с вулканогенными отложениями, силлами и дайками габбрового состава.

Полоса складчатости протягивается в северо-западном направлении через Пай-Хой–Вайгач–южную часть архипелага и налегает на структуры Печорской плиты. В рифее закладывается Новоземельский прогиб. В Пайхой–Южноновоземельском сегменте складчатого пояса происходили левосторонние смещения, максимальные по амплитуде в Байдарацкой зоне разломов [10]. Северо-Сибирский порог ограничивает Новоземельскую микроплиту с северо-востока, имеет сложный сдвиго-надвиговый генезис.

Новоземельское поднятие с запада претерпевает интенсивное сжатие. Кайнозойский подъем арх. Новая Земля был неотектонический, сопровождался блоковыми движениями [11].

При глубинных напряжениях в земной коре, когда превышен порог прочности породы, возникают разрывные нарушения. Исследования разломов землетрясений показали, что разрушение может быть сдвигом или разрывом. Межблоковые промежутки для пород на поверхности разрыва могут достигать до 100 м, на глубинах это – узкая зона от 1 см до 1 м, т.к. породы обладают разными упругими характеристиками. В очагах напряжений землетрясения могут происходить на существующем геологическом разломе.

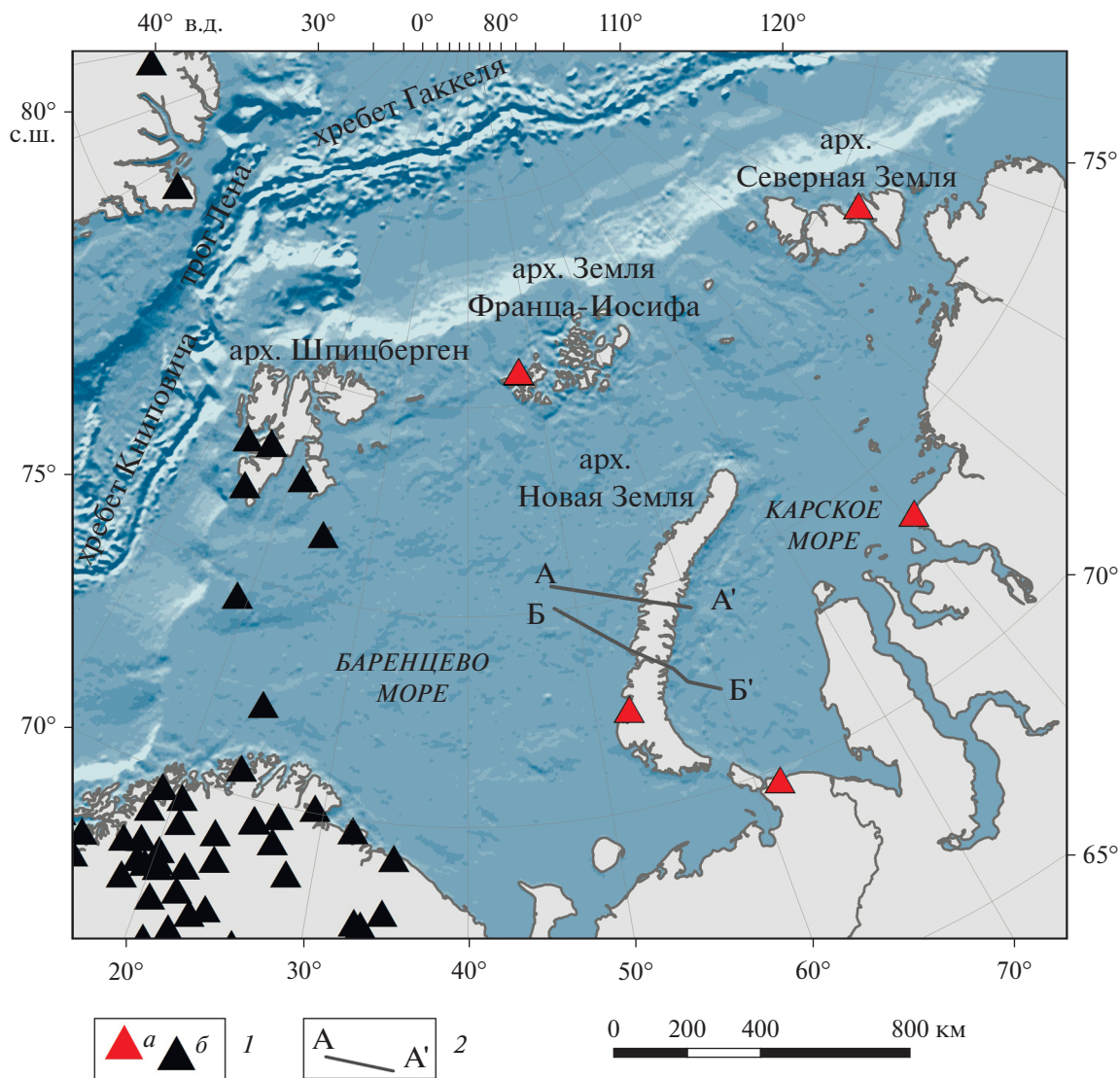


Рис. 1. Регион исследований на батиметрической карте.

1 – сейсмические станции: а – российские (ФИЦКИА УрО РАН); б – международных агентств; 2 – линии геолого-геофизических профилей, по [7]

В разломных зонах и в разрывных нарушениях происходит релаксация среды [15]. Границы геологических структур имеют сложную морфологию и в некоторых случаях не картируются разрывными нарушениями [21].

Отличительной особенностью Баренцево-Карского региона является асейсмичность шельфовых областей (рис. 2).

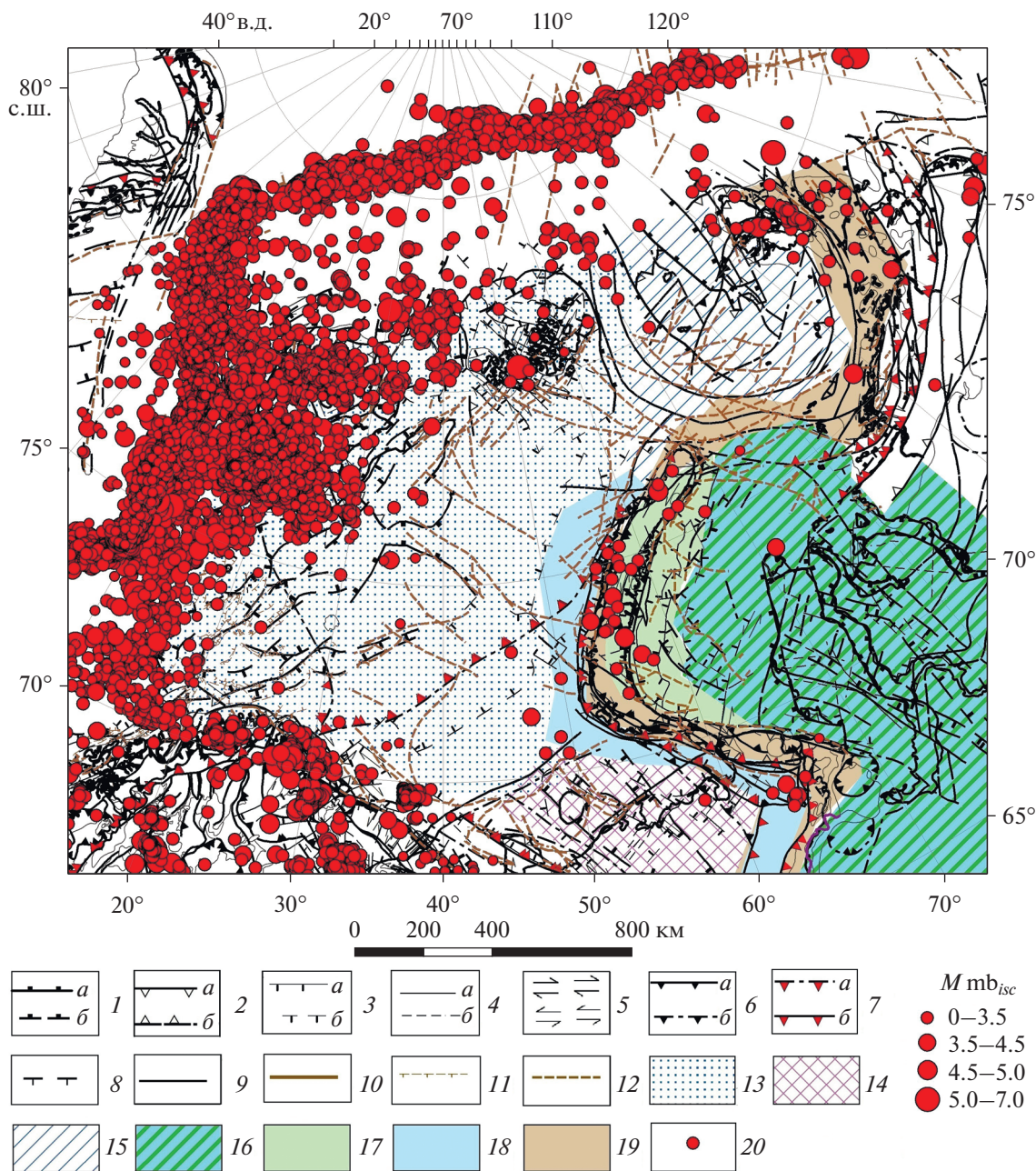
Эпицентры землетрясений в основном приурочены к арктическим желобам, зонам новейших тектонических разломов, структурным поднятиям. Геолого-геофизические инструментальные исследования Баренцево-Карского региона проводились с разной плотностью, в связи с чем, многие места положения очагов землетрясений попали в область отсутствия глубинных геофизических исследований.

Баренцевская плита, Новоземельская складчатая система, являющаяся северо-западным фрагментом Урало-Монгольского складчатого пояса и северной части Западно-Сибирской плиты значительно влияют на передачу возмущений [7]. Пространственно-временные структуры разного уровня и масштаба, представляющие собой вложенные друг в друга сегменты, соответствуют ранжированию геологической среды на блоки и создают соответствующие рангу структуры напряженно-деформированные состояния [8].

На архипелаге Новая Земля, шельфе Баренцева и Карского морей были проведены геолого-геофизические исследования [22, 25, 26] и в частности:

– выполнена регулярная сеть сейсмоакустических профилей;





**Рис. 2.** Сейсмотектоническая схема арктической части Евразии (построена по данным [4, 27, 35], с дополнениями). 1–4 – новейшие (поздний неоплейстоцен–голоцен, поздний плиоцен–средний неоплейстоцен) активные разломы с учетом данных [4]: 1 – сбросы (штрихи на опущенном крыле): а – достоверные, б – предполагаемые; 2 – взбросы (треугольники на приподнятом крыле): а – достоверные, б – предполагаемые; 3 – разломы неустановленного типа (штрихи на опущенном крыле): а – достоверные, б – предполагаемые; 4 – разломы без установленного смещения: а – достоверные, б – предполагаемые; 5 – направление смещения при сдвигах; 6–9 – разломы с учетом данных [27]: б – надвиг и взброс: а – достоверные, б – предполагаемые; 7 – фронт деформаций для орогенов: а – достоверные, б – предполагаемые; 8 – нормальные литрические разломы, 9 – неклассифицированные разломы; 10–12 – разломы с учетом данных [35]: 10 – активный спрединговый центр, 11 – сброс; 12 – неклассифицированные разломы; 13–16 – континентальная плита: 13 – Баренцевоморская, 14 – Тимано-Печорская, 15 – Карская, 16 – Западно-Сибирская; 17 – Новоземельская микроплита; 18 – краевые прогибы; 19 – складчатые области, подвергшиеся герцинским тектоническим деформациям; 20 – эпицентры землетрясений за 1980–2022 гг.

– пройден комплексный геофизический геотраверс АР-2;  
 – получены глубинные геолого-геофизические разрезы.

Большая концентрация землетрясений рассматриваемого района сосредоточена на площади, ограниченной координатами 72°–76° с.ш. и 48°–60° в.д., в которую входят большая часть Се-



верного острова и северная половина Южного острова архипелага Новая Земля, разделенные проливом Маточкин Шар [7].

Для проведения анализа напряженно-деформированного состояния среды в полях напряжений элементов структур в районе арх. Новая Земля, включая акваторию Баренцева и Карского морей, мы воспользовались геолого-геофизическими разрезами по профилям А–А' и Б–Б', которые проходят через районы максимальной концентрации сейсмических событий (рис. 3).

Сводная карта сейсмичности арх. Новая Земля за 1980–2022 гг. с указанием эллипсов ошибок для каждого землетрясения (доверительный интервал определения эпицентра землетрясения) дополнена информацией о локальных землетрясениях, зарегистрированных только сейсмической станцией “Новая Земля”, имеющей код NVZ, их эллипс ошибки показан зеленым цветом (см. рис. 3). На карту вынесены значения теплового потока, которые имеют неравномерный характер, но привлекаются для последующего анализа сейсмической обстановки рассматриваемого региона.

## ПОЛУЧЕННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

### *Разработка сейсмического каталога арктической части Евразии*

В качестве временного интервала анализируемых сейсмических данных для создания сейсмического каталога региона исследований мы рассматривали период 1985–2022 гг., когда количество и расположение сейсмических станций в Европейской части Арктики стало достаточным для удовлетворительного определения параметров землетрясений. Подготовка каталога проведена отдельно для каждого района – хребта Гаккеля, хребта Книповича, трога Лены и арх. Новая Земля.

Для формирования каталога мы воспользовались каталогом Международного сейсмологического центра (International Seismological Center (ISC)), который на момент проведения наших исследований заканчивался июнем 2021 г. [42]. Данные по сейсмичности восточной части хребта Гаккеля и арх. Новая Земля с июля 2021 г. по 2022 г. были дополнены данными локального каталога Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврова УрО РАН (ФИЦКИА УрО РАН, г. Архангельск, Архангельская обл., Россия) (см. рис. 2).

Для очистки каталога для арх. Новая Земля от ядерных взрывов мы использовали опубликованные данные [56]. Кроме этого, привлекались результаты работ [45, 47], в которых подробно рас-

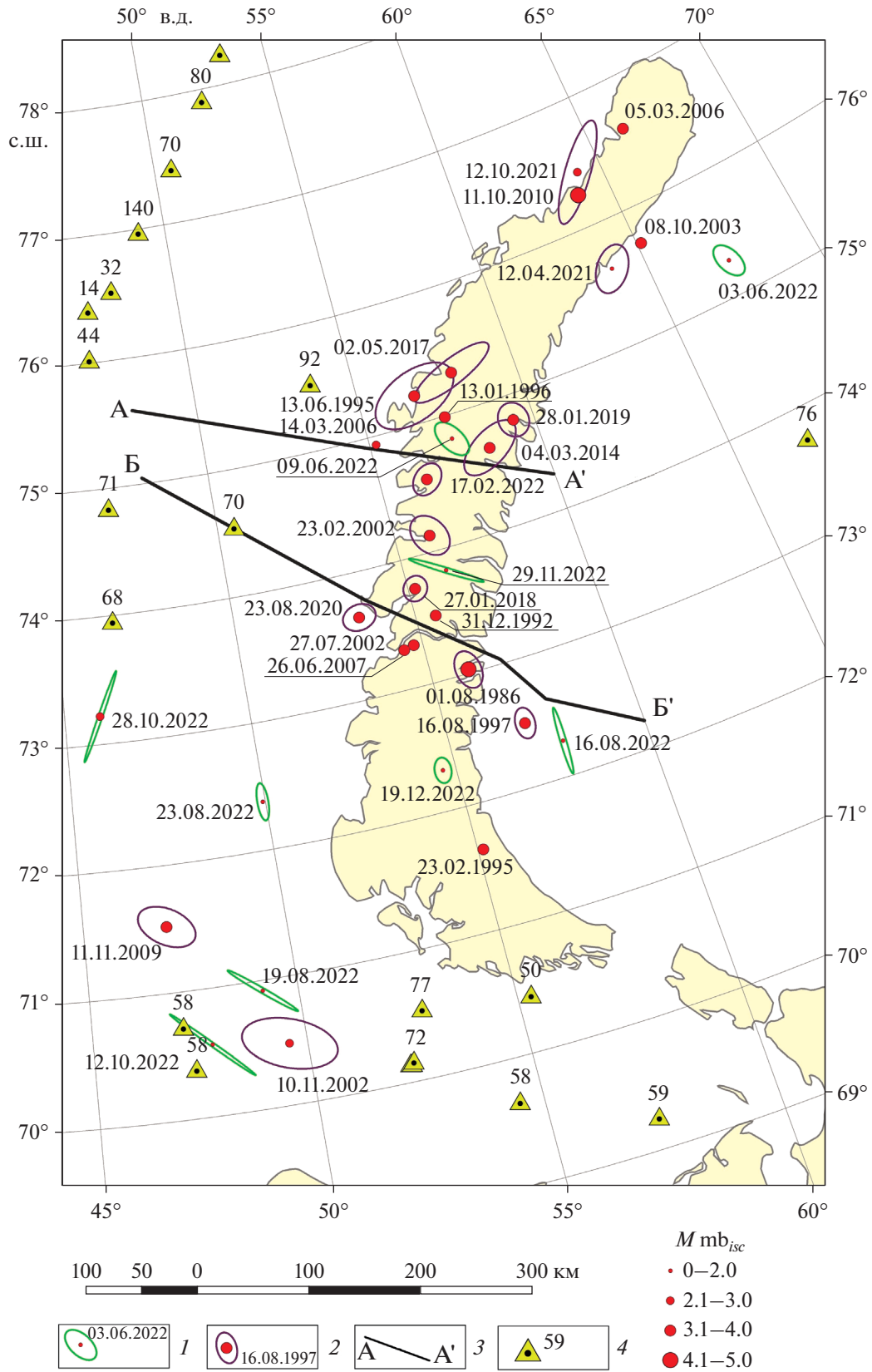
сматривается природа сейсмических событий и уточняются параметры землетрясений, в частности, приведен расчет эллипсов ошибок.

В целях улучшения качества мониторинга Западного сектора Российской Арктики и сопредельных территорий (понижение представительной магнитуды и расширение азимутального охвата эпицентров землетрясений) в июле 2022 г. ФИЦКИА УрО РАН (г. Архангельск, Архангельская обл., Россия) и Геофизическим институтом РАН (ГИН РАН, г. Москва, Россия) на острове Южный архипелага Новая Земля на территории аэрологической станции “Малые Кармакулы” была установлена стационарная сейсмическая станция “Новая Земля” (код NVZ) Северного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Северное УГМС). Передача данных на сервер ФИЦКИА УрО РАН производится в режиме близком к реальному времени (каждые сутки). Все землетрясения, включая те, которые зарегистрированы только одиночной станцией NVZ в районе арх. Новая Земля, мы включили в сформированный нами сейсмический каталог.

При обработке землетрясений, зарегистрированных только станцией NVZ, мы использовали программу EL (Event Locator) [24] и провели оценку погрешности определения их эпицентров, что является обязательной частью при локации сейсмических событий. В данном случае это не классический метод построения эллипса ошибок, а только оценочное определение его полуосей. Погрешность первой полуоси связана с погрешностью по глубине (от 0 до 30 км), второй полуоси – с неточностью определения азимута ( $\pm 10^\circ$ ). Этот метод локации позволяет получить первичные представления о распределении эпицентров событий.

Каталог ISC [42] включает данные разных сейсмологических агентств и по каждому землетрясению приводятся различные типы магнитуд ( $M_L$ ,  $m_b$ ,  $M_w$ ), в том числе магнитуда  $m_b$ , вычисленная Международным сейсмологическим центром ISC по данным десятков станций. Множество типов магнитуд связано с удаленностью станций сети каждого сейсмологического агентства от эпицентральной зоны землетрясения, а также принятыми формулами расчета магнитуды, разработанные в каждом сейсмологическом агентстве. Сейсмический каталог ФИЦКИА УрО РАН, например, содержит локальную магнитуду  $M_L$ , уточненную для Западного сектора Российской Арктики [18].

Таким образом, для анализа сейсмических данных необходимо было унифицировать магнитуды. Проблеме унификации магнитуд касалось много работ отечественных и зарубежных исследователей, для района Европейской Арктики можно выделить публикации Н.В. Петровой с



**Рис. 3.** Сводная карта сейсмичности архипелага Новая земля за 1986–2022 гг. и значений теплового потока. 1–2 – эпицентры землетрясений с эллипсом ошибки: 1 – зафиксированные только станцией NVZ, 2 – более, чем тремя сейсмическими станциями; 3 – линии глубинных сейсмических профилей, по [7]; 4 – значения теплового потока,  $\text{мВт/м}^2$ , по [29, 31, 53]

**Таблица 1.** Формулы унификации различных типов магнитуд к магнитуде  $M_{mb_{ISC}}$ .

Уравнения ортогональной регрессии	Магнитудный диапазон выборки	Среднеквадратическое отклонение, $\sigma$	Объем выборки, $N$	Источник
$mb_{ISC} = 0.87mb_{BER}(P_n) + 0.40$	$3.5 \leq mb_{BER}(P_n) \leq 7.0$	0.20	133	[43]
$M_{wBER} = 0.88mb_{ISC} + 0.89$	$3.5 \leq M_{wBER} \leq 7.0$	0.15	133	[43]
$mb_{ISC} = 1.55mb_{EIDC} - 1.91$	$3.0 \leq M_{wBER} \leq 5.5$	0.51	604	[48]
$mb_{ISC} = 1.60mb_{IDC} - 2.06$	$2.8 \leq mb_{IDC} \leq 5.9$	0.33	1795	[48]
$mb_{ISC} = 1.13mb_{NEIC} - 0.75$	$2.9 \leq mb_{NEIC} \leq 6.6$	0.48	1389	[48]
$mb_{ISC} = 0.88M_{SISC} + 0.84$	$2.4 \leq M_{SISC} \leq 6.4$	0.52	1237	[48]
$mb_{ISC} = 1.45M_{LFCIAR} - 1.70$	$2.6 \leq M_{LFCIAR} \leq 6.3$	0.51	219	[48]
$mb_{ISC} = 0.94M_{LBER} + 1.19$	$1.3 \leq M_{LBER} \leq 5.7$	0.56	960	[48]
$mb_{ISC} = 0.92M_{LNAO} + 0.44$	$2.3 \leq M_{LNAO} \leq 5.9$	0.56	558	[48]
$mb_{ISC} = 0.95M_{LKOLA} + 0.35$	$2.4 \leq M_{LNAO} \leq 5.8$	—	341	[23]
$M_S = 1.47mb_{ISC} - 2.91$	$h \leq 70$ км	—	—	[3]
$lgE$ (эрг) = $1.5M_S + 11.8$	—	—	—	[3]

соавт. [23], P. Klitzke et al [43], A.N. Morozov et al. [48], I.A. Vorobieva et al. [55].

Для унификации магнитуд создаваемого обобщенного сейсмического каталога мы использовали формулы ортогональной регрессии и получили магнитуду, унифицированную относительно магнитуды  $mb$  Международного сейсмологического центра ISC ( $mb_{ISC}$ ) (табл. 1).

Разработанный нами обобщенный сейсмический каталог для района арх. Новая Земля содержит данные не только об основных параметрах землетрясений, но и включает эллипсы ошибок при локации некоторых землетрясений (табл. 2).

#### Формирование базы данных по тепловому потоку

База данных значений теплового потока была сформирована нами из различных источников [31, 32, 37, 53]. Интерполяция данных производилась средствами программного комплекса ArcGis [9], с применением набора инструментов Spatial Analyst Tools – Торо to Raster [52]. Данный метод интерполяции, основанный на программе ANUDEM, которая была специально создана для решения задачи создания регулярно-сеточных цифровых моделей рельефа по данным топографических карт [40, 41].

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 флексурообразно деформируются без разрыва сплошности. Если при землетрясении происходит разрыв сплошности среды, то возможно наблюдать по-

ниженные температуры и низкий тепловой поток [30]. Пространственное несовпадение аномалий теплового потока и эпицентров землетрясений для района арх. Новая Земля на данный момент не позволяет рассмотреть антибатную зависимость сейсмической активности.

#### Методика исследований распространения возмущений

Волновые деформационные процессы, распространяющиеся в земной коре с различными скоростями, детально рассмотрены в работах [1, 2, 16, 33]. Деформационные волны возбуждаются большей частью естественными процессами в литосфере и проявляются в изменениях сейсмической активности и геофизических полей. Блоковая структура геологической среды существенно влияет на передачу подобных возмущений. Выявление связей между движениями тектонических структур и волновыми деформационными процессами имеет первостепенное значение [1, 16].

Мы рассмотрели процесс влияния хребтов Гаккеля и Книповича, и трога Лены, характеризующихся низкой скоростью спрединга, на сейсмичность арх. Новая Земля путем анализа временного распределения годовой сейсмической энергии [51]. Годовая сейсмическая энергия была получена непосредственным сложением энергий всех землетрясений, произошедших в каждом отдельном районе (хребет Гаккеля, район архипелага Новая Земля и т.д.). Для расчета энергии преобразуем магнитуду объемных волн ( $mb_{ISC}$ ) в магнитуду поверхностных волн ( $M_S$ ), по [3]:

$$M_S = 1.47mb_{ISC} - 2.91. \quad (1)$$



**Таблица 2.** Сейсмический каталог района архипелага Новая Земля за 1986–2022 гг.

Дата (день, месяц, год)	Время в очаге (час:мин:сек)	Широта с.ш., °	Долгота в.д., °	Глубина, км	Магнитуда, $m_b_{ISC}$	Эллипс ошибок			Источник
						$Az_{major}$	$R_{minor}$ , км	$R_{major}$ , км	
01.08.1986	13:56:40.1	73.03	56.01	0	4.6	170	11.2	17.1	[47]
31.12.1992	09:29:24.5	73.51	55.56	—	3.2	—	—	—	[45]
23.02.1995	21:50:01.5	71.64	55.14	—	3.2	—	—	—	[45]
13.06.1995	19:22:37.9	75.22	56.74	0f	3.4	70	21.7	39.8	[47]
13.01.1996	17:17:21.1	74.99	57.45	—	3.1	—	—	—	[45]
16.08.1997	02:10:59.3	72.50	57.04	0	3.8	1	8.7	13.8	[42]
23.02.2002	01:21:17.6	74.13	56.01	0	3.5	150	14.4	20.0	[47]
27.07.2002	18:20:45.0	73.33	54.76	—	3.4	—	—	—	[45]
10.11.2002	11:04:41.5	70.48	49.58	10f	3.0	110	21.2	42.3	[47]
08.10.2003	23:07:15.9	75.71	65.14	—	3.0	—	—	—	[45]
05.03.2006	23:17:31.7	76.59	66.24	—	3.1	—	—	—	[45]
14.03.2006	20:56:57.5	74.93	55.20	—	2.8	—	—	—	[45]
26.06.2007	03:19:17.6	73.31	54.47	—	3.3	—	—	—	[45]
11.11.2009	04:18:20.2	71.52	47.06	0f	3.2	120	15.6	26.6	[47]
11.10.2010	22:48:27.8	76.25	63.90	14	4.7	15	5.2	6.2	[42]
04.03.2014	04:42:34.0	74.65	58.45	40	3.1	60	14.7	30.0	[47]
02.05.2017	13:35:42.0	75.31	58.05	25	3.2	70	11.3	40.9	[42]
27.01.2018	02:12:51.9	73.75	55.19	32	3.2	40	10.3	11.5	[42]
28.01.2019	20:45:11.0	74.80	59.39	33	3.4	170	13.3	15.5	[42]
17.02.2020	17:06:23.0	74.56	56.39	26	3.4	50	11.0	15.3	[42]
23.08.2020	03:26:19.2	73.64	53.47	32	3.5	80	11.2	14.9	[42]
12.04.2021	10:41:08.7	75.62	63.95	20	1.9	40	13.6	22.0	[42]
12.10.2021	15:45:08.7	76.43	64.21	15	2.7	40	11.2	47.6	[42]
03.06.2022	22:47:36.2	75.28	67.38	15	1.8	70	9.3	16.8	[42]
09.06.2022	20:10:30.5	74.81	57.45	24	1.8	60	9.6	18.6	[42]
16.08.2022	12:54:08.7	72.28	57.85	5f	1.1	91	2.6	30.1	*
19.08.2022	09:40:41.2	70.92	49.15	5f	1.6	219	2.2	35.5	*
23.08.2022	10:19:30.8	72.38	49.93	5f	0.3	270	4.8	16.5	*
12.10.2022	12:25:34.3	70.56	47.79	5f	1.8	223	1.7	45.9	*
28.10.2022	08:05:40.2	73.22	45.97	5f	2.1	295	1.8	42.3	*
29.11.2022	12:36:49.6	73.83	56.18	5f	1.2	33	2.2	34.4	*
19.12.2022	07:38:18.5	72.32	54.66	5f	0.8	95	7.3	11.2	*

Примечание. \* — землетрясения, зарегистрированные только станцией NVZ.

Тогда энергия вычисляется по [3]:

$$\lg E (\text{эрг}) = 1.5M_S + 11.8. \quad (2)$$

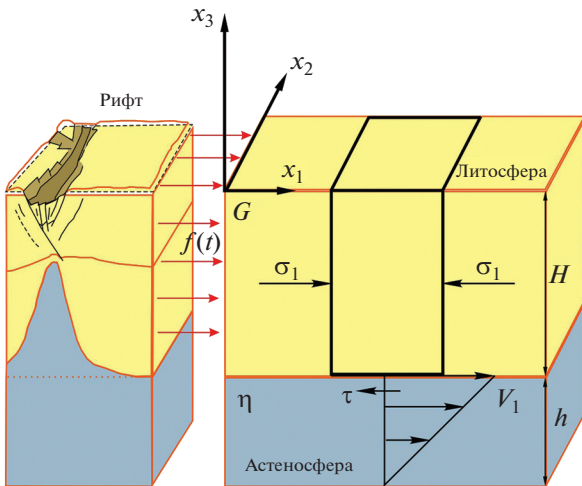
Процесс влияния силы отталкивания от СОХ на сейсмичность архипелага Новая Земля можно решить аналитически, путем применения модели Эльзассера.

В. Эльзассер [38] впервые предложил теорию литосферных волноводов напряжений и создал уравнение для переноса локальных напряжений в

жесткой упругой литосфере, подстилаемой вязкой астеносферой, которая впоследствии использовалась с различными модификациями (рис. 4).

#### Постановка задачи

В постановке задачи исследуется возмущение процесса, вызванного отталкиванием однородно-напряженной плиты от рифта с установленной скоростью  $V_0 = \text{const}$  [20]. Стационарное



**Рис. 4.** Схема передачи возмущений в системе литосфера—астеносфера. Обозначено:  $H$  — мощность литосферы (полубесконечная упругая пластина);  $\sigma$ ,  $\tau$  — нормальное и касательное напряжения на подошве литосферы;  $h$  — мощность астеносферы, моделируемая линейно-вязкой жидкостью;  $\eta$  — вязкость;  $V_1$  — скорость скольжения литосферной плиты, нормальной к плоскости разлома.

состояние характеризуется установившимся режимом внедрения горячего материала в океаническую рифтовую зону, что и служит источником возмущений края плиты. Принимаем, что аномальный процесс внедрения длится в течение промежутка времени  $T$ .

При интенсификации процесса внедрения край плиты приобретает скорость  $V_1(t) > 0$  и дополнительное напряжение  $\sigma_1(t) > 0$ . Исходя из предположения, что при движении плиты напряжение сдвига на нижней границе плиты уравнивается общим горизонтальным напряжением на краю плиты, уравнение для осредненного по толщине плиты смещения  $u$  будет иметь вид уравнения диффузии или уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = a \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2}, \quad (3)$$

$$a = \frac{2G}{\eta(1-\nu)} Hh,$$

где  $H$  — мощность литосферы,  $h$  — мощность астеносферы,  $G$  — модуль сдвига,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $\eta$  — вязкость. Ключевым элементом модели является вязкое сцепление между литосферой и астеносферой, которое в общем случае зависит от длины волны возмущения.

В соответствии с [44] для архипелага Новая Земля  $H = 190$  км, мощность вязкой низкосо-

ростной астеносферы порядка 100 км, коэффициент Пуассона 0.3 [6], модуль сдвига  $G = 3.42 \times 10^{10}$  Па [17].

Уравнение (3) имеет аналитическое решение [36], представленное в виде [20]:

$$f(x_1, t) = \begin{cases} \Phi^* \left( \frac{x_1}{2\sqrt{at}} \right), & \text{при } 0 < t < T \\ \Phi^* \left( \frac{x_1}{2\sqrt{at}} \right) - \Phi^* \left( \frac{x_1}{2\sqrt{a(t-T)}} \right), & \text{при } T < t < \infty, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\Phi^*(\xi) = 1 - \Phi(\xi),$$

$$\Phi(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi e^{-\xi^2} d\xi - \text{интеграл ошибок.}$$

Коэффициент вязкости  $\eta$  варьируется в расчетах и выбирается для получения максимального подобия результатов моделирования и натуральных данных.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

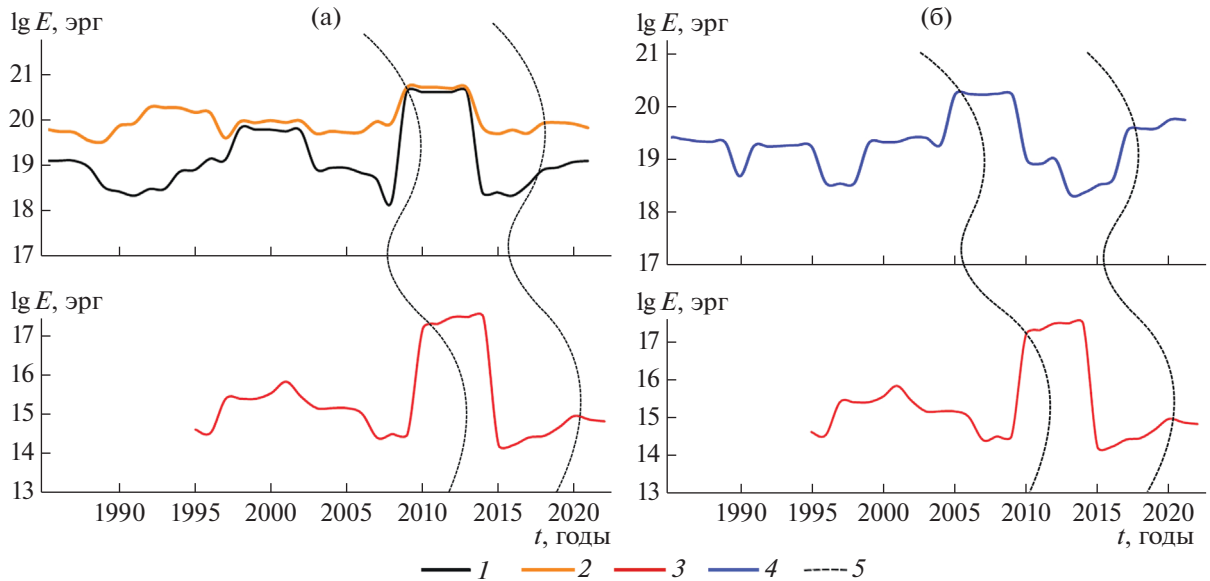
### Влияние СОХ на сейсмичность арх. Новая Земля

В результате нами были получены кривые выделения сейсмической энергии за год для хребта Гаккеля, системы хребет Книповича—трог Лены, отдельно для этих геологических структур, а также для архипелага Новая Земля (рис. 5).

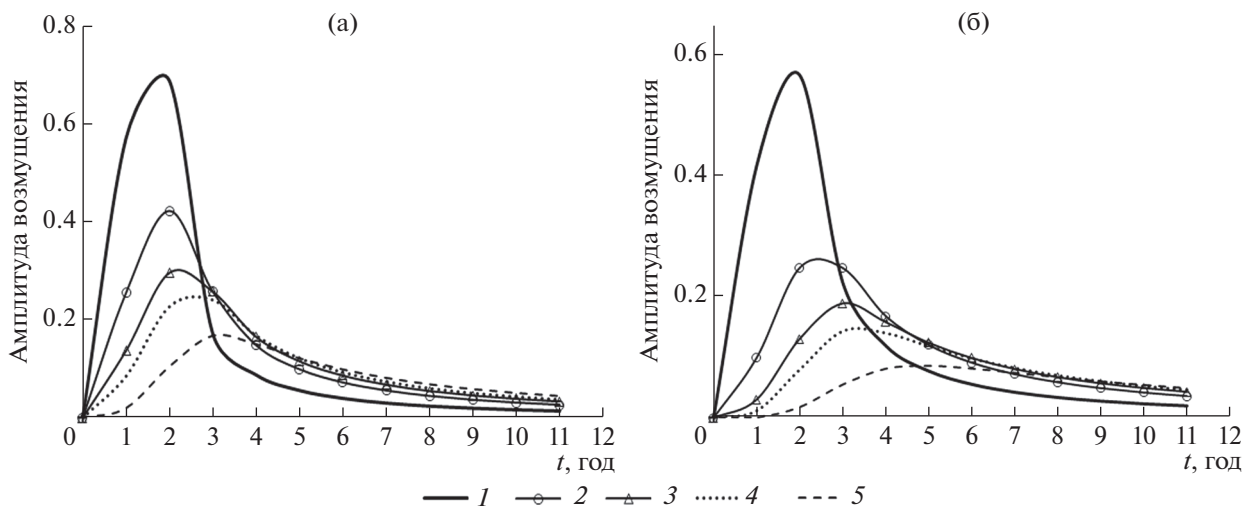
Кривая годовой реализации сейсмической энергии для всех рассматриваемых геологических структур сглаживалась в 5-летнем окне.

Сравним временной ход комбинации различных кривых. Наблюдается определенное подобие между кривыми, причем график распределения выделившейся сейсмической энергии для геологической системы хребет Книповича—трог Лены наиболее схож с аналогичным графиком для арх. Новая Земля. При этом в системе хребет Книповича—трог Лены больший вклад в сейсмичность арх. Новая Земля оказывает трог Лены, что можно наблюдать из сопоставления кривых (см. рис. 5, а).

Запаздывание кривых для арх. Новая Земля относительно графика для системы хребет Книповича—трог Лены составляет в среднем 1–2 года, для хребта Гаккеля — 3–5 лет. Это можно объяснить различиями в геологическом строении блоковых структур между рассматриваемыми хребтами и архипелагом и пространственным расположением хребтов относительно арх. Новая Земля (см. рис. 1, см. рис. 3).



**Рис. 5.** Распределение выделившейся сейсмической энергии по годам с 1985 по 2022 гг. 1 – трог Лены; 2 – геологическая система хребет Книповича–трог Лены (оранжевая); 3 – арх. Новая Земля; 4 – хр. Гаккеля; 5 – возможная корреляция (визуальное сходство) в передаче возмущений между тектоническими структурами



**Рис. 6.** Изменение амплитуды возмущений со временем на различных расстояниях от геологической системы хребет Книповича–трог Лены (а) и хребта Гаккеля (б). Расстояния: 1 – 500 км; 2 – 1000 км; 3 – 1300 км; 4 – 1500 км; 5 – 2000 км

Нами представлены результаты расчетов амплитуд возмущения в зависимости от расстояния от источника и времени, полученные в сравнении с таковыми для арх. Новая Земля, при:

$\eta = 1.5 \times 10^{17}$  Па с,  $T = 1$  год для системы хребет Книповича–трог Лены (см. рис. 5, а);

$\eta = 3.1 \times 10^{17}$  Па с,  $T = 1$  год для хребта Гаккеля (см. рис. 5, б).

Результаты моделирования передачи возмущений от СОХ к арх. Новая Земля показывают следующее (рис. 6).

Максимальное возмущение на расстоянии 500 км от рассматриваемых геологических структур возникает через 2 года после того, как процесс возмущений начал действовать на краю плиты, причем максимальное значение от величины возмущения, приложенного к краю плиты, составляет:

$\geq 70\%$  для геологической системы хребет Книповича–трог Лены;

$\geq 60\%$  для хребта Гаккеля.



Максимальные возмущения в районе арх. Новая Земля на расстоянии 1300–1500 км, распространяющиеся от геологической системы хребет Книповича–трог Лены, возникают через 2 года и составляют 30% от прикладываемого значения возмущений.

Относительно хребта Гаккеля максимальные возмущения на расстоянии 1000–2000 км возникают через 3–5 лет и на расстоянии от прикладываемого значения возмущений составляют:

25% – 1000 км;

19% – 1300 км;

14% – 1500 км;

9% – 2000 км.

Подобные результаты находятся в хорошем согласовании с экспериментальными данными при рассмотрении воздействий, оказываемых каждым хребтом в отдельности, на арх. Новая Земля (см. рис. 5).

Скорость распределения возмущений от рассматриваемых геологических структур варьирует от 0.5 до 2 км/день.

#### *Корреляция теплового потока, сейсмичности и глубинного строения*

Современная сейсмичность и плотность теплового потока являются индикаторами геодинамических процессов. Для возможной корреляции в передаче возмущений между тектоническими структурами, в том числе от СОХ, мы привлекли результаты глубинных исследований в районе арх. Новая Земля (см. рис. 3).

Мы провели сопоставление распределения значений теплового потока, сейсмичности, протяженности структурных элементов и геолого-геофизических разрезы вдоль профилей А–А' и Б–Б' (табл. 2, см. рис. 3, рис. 7, рис. 8).

Для обоих профилей значения теплового потока центральной части арх. Новая Земля и прилегающих районов шельфа Баренцева и Карского морей довольно стабильны и определены в пределах 60–70 мВт/м<sup>2</sup> (см. рис. 7, см. рис. 8). Землетрясения приурочены к основным структурным элементам. На глубинном разрезе по линии Б–Б' хорошо отражены разрывные нарушения, показаны структурные этажи сейсмокомплексов, отвечающих за смену геодинамической обстановки, проявлен генезис отложений Баренцево-Карского шельфа, представлена складчатость деформаций Центрально-Новоземельского мегантиклинория (рис. 7, г).

Представлены сутуры – глубинные мантийные разломы, которые отражают прогиб в мантии и в нижней коре (см. рис. 8, г: разрез по линии А–А'). Разрывные нарушения в верхней и средней коре показывают зону складчато-надвиговых обла-

стей. Продолжающееся развитие глубинных надвигов и зоны субдукции, сопряженной с осадочными бассейнами, проявляется на современном этапе в виде сейсмической активности. На глубинный разрез вынесены гипоцентры землетрясений в соответствии с созданным сейсмическим каталогом (см. табл. 2).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

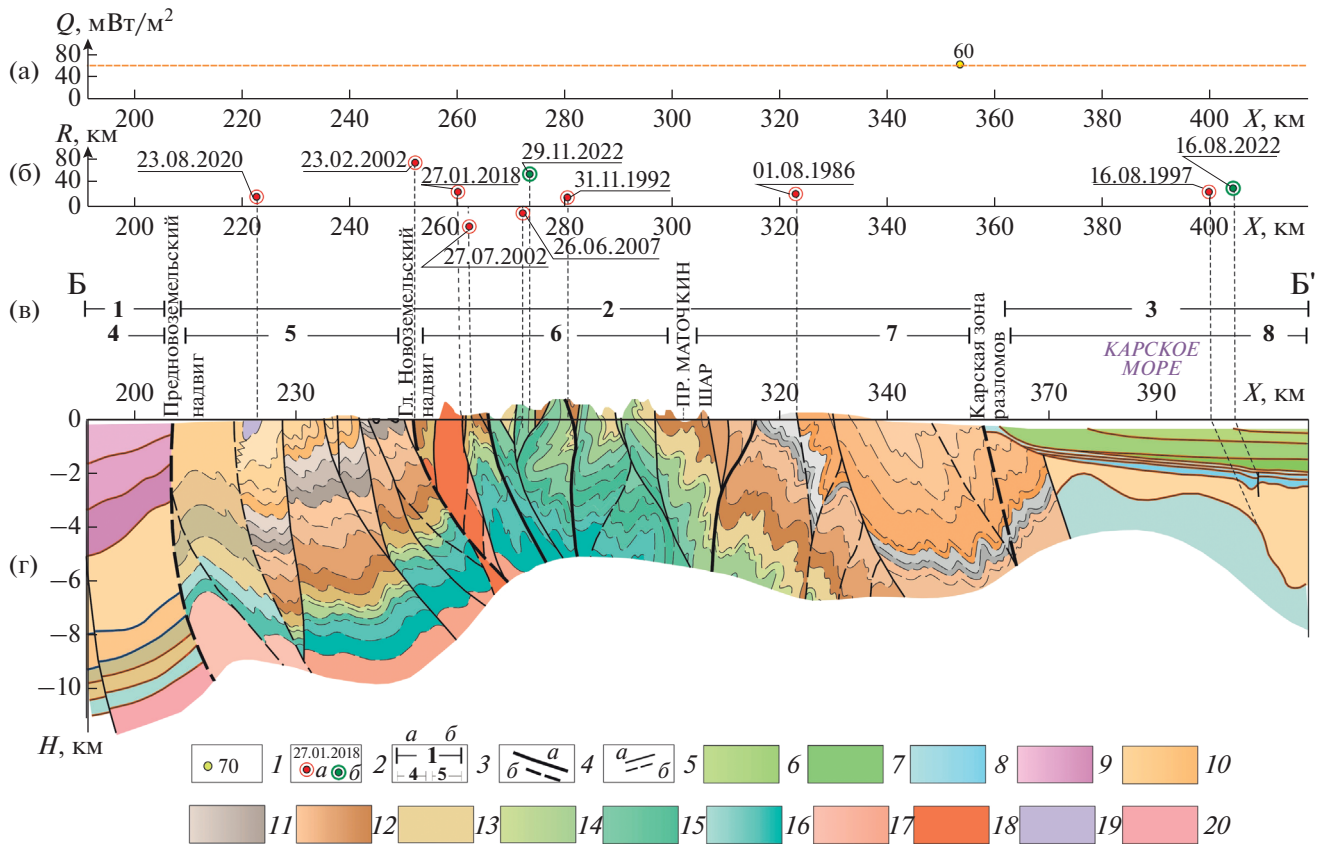
Из сопоставления полученных модельных расчетов с наблюдаемыми величинами можно отметить, что получены весьма схожие результаты, т.е. модель с подобранными значениями коэффициентов вязкости астеносферы, достаточно хорошо описывает временные характеристики процесса передачи возмущений на расстояния. Мы не беремся анализировать значения коэффициента вязкости, которые оказались заметно ниже, чем в других работах [39, 50, 54], понимая, что используемая нами модель имеет ограничения [1]. Тем не менее, аналогичные оценочные значения имеются в работах [20, 46, 49].

Землетрясения маркируют тектонически активные зоны земной коры и являются результатом превышения предела прочности накопленных напряжений, порождаемых глубинными эндогенными процессами. При наличии квазициклических воздействий от СОХ и влияющих на сейсмичность, можно предположить, что эти воздействия могли послужить триггером для сброса накопившихся напряжений.

Полученные величины затухания возмущений от рассматриваемых структур СОХ при продвижении по литосфере вполне правдоподобны: на расстоянии 1300–2000 км амплитуда возмущения падает от 30% до 9% от первоначальной величины, что представляется вполне достаточным для триггерного воздействия на сейсмичность арх. Новая Земля.

Для профиля Б–Б' преобладающая часть землетрясений приурочена Центрально-Новоземельской мегантиклинории (см. рис. 7, г). Можно выделить область Главного Новоземельского разлома (долгоживущий глубинный шов, ширина на юге – 10–20 км, на севере до 2–3 км), вдоль которого фиксируются большинство современных событий (см. рис. 7, г).

В области Главного Новоземельского разлома развиты взбросо-надвиги, падающие на восток–юго-восток, к данной области приурочен выход позднепротерозойской интрузии (Митюшевский комплекс аляскиит-гранитов) [7, 12]. Для всех тектонических единиц Центрально-Новоземельского мегантиклинория характерна отчетливо линейная голоморфная складчатость. Степень интенсивности дислокаций в пределах крупных продольных



**Рис. 7.** Распределение значений теплового потока (а); сейсмичность (б); протяженность структурных элементов (в); геолого-геофизический разрез вдоль профиля Б–Б' (г), (с использованием данных [7]).

Структурные элементы 1-го порядка (арабские цифры жирным шрифтом), 2-го порядка (арабские цифры тонким шрифтом):

**1** – Предновоземельская региональная ступень (**4** – Гусиноземельская субрегиональная ступень); **2** – Центрально-Новоземельский мегантиклинорий (**5** – Западно-Новоземельский моноклинорий, **6** – Северо-Новоземельский антиклинорий, **7** – Карский синклинорий); **3** – Западно-Сибирская платформа (**8** – Припайхойско-Приновоземельская моноклиза).

*1* – значения теплового потока, мВт/м<sup>2</sup> (по [29]); *2* – эпицентры землетрясений, зарегистрированные: *a* – только станцией NVZ, *b* – более, чем тремя сейсмическими станциями (см. рис. 1); *3* – границы структурных элементов: *a* – достоверные; *b* – предполагаемые; *4–5* – тектонические нарушения с учетом данных [7]: *4* – главные: *a* – достоверные; *b* – предполагаемые; *5* – второстепенные: *a* – достоверные; *b* – предполагаемые; *6–20* – сейсмокомплексы осадочных отложений с учетом данных [7]: *6* – меловых (верхний отдел), *7* – меловых (нижний отдел), *8* – юрских, *9* – триасовых, *10* – пермских, *11* – каменноугольных, *12* – девонских, *13* – нерасчлененных девонско–силурийских, *14* – нерасчлененных ордовикско–силурийских терригенно–карбонатных пород, *15* – сланцев, песчаников, алевролитов раннего позднего ордовика, *16* – известняково–терригенных толщ раннего-среднего кембрия, *17* – амфиболитов, сланцевых толщ позднего протерозоя, *18* – аляскит–гранитовый интрузивный комплекс позднего протерозоя (RF<sub>3</sub>), *19* – терригенно молассовая толща с вулканитами, возраст (P<sub>3</sub>–T<sub>1</sub>ad), *20* – сланцев, кристаллосланцев верхнепротерозойские

блоков находится в прямой зависимости от приуроченности их к крупным разломам [10].

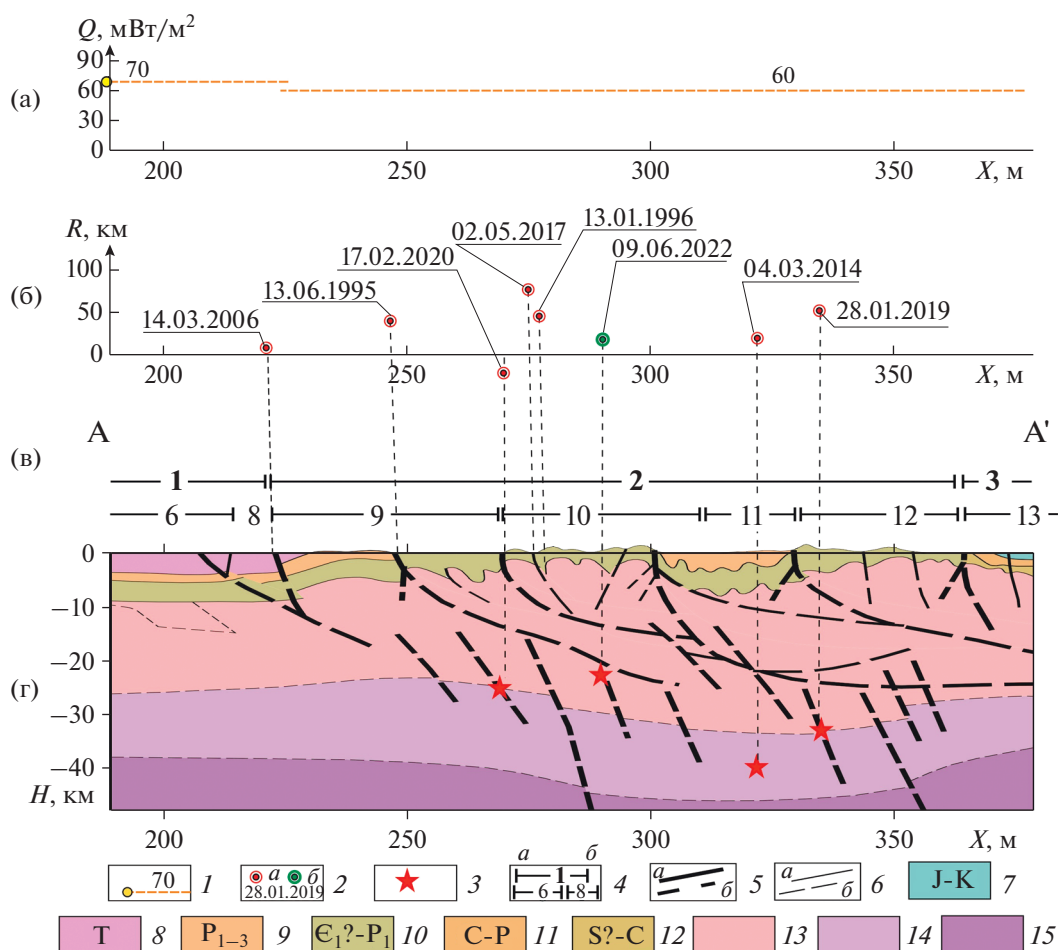
Землетрясение, произошедшее 23.08.2020 г. в Западно-Новоземельском моноклинории, приурочено зоне коллизии межплитного орогенеза пестроцветно терригенно молассовой толщи с вулканитами, возраст (P<sub>3</sub>–T<sub>1</sub>ad) (см. рис. 7, г).

Эпицентры сеймотектонических событий, возникших 31.11.1992 г., 29.11.2002 г. и 26.06.2007 г. можно отнести к Северо-Новоземельскому антиклинорию (см. рис. 7). Эпицентр землетрясения 1.08.1986 г. находился в разломе в блоке Карского синклинория.

Пассивная континентальная окраина, включающая шельф, слагается известняково-терригенными формациями, а континентальный склон и подножие состоят из карбонатно-кремнисто-терригенных формаций [7]. Данный район является асейсмичным, тем не менее, редкие землетрясения происходят в районе разлома Припайхойско-Приновоземельской моноклизы (см. рис. 7, г).

Для части землетрясений вдоль профиля А–А' нами были рассчитаны гипоцентры, обозначенные звездочками на глубинном разрезе (см. рис. 8, г).

Эти землетрясения относятся к Центрально-Новоземельскому мегантиклинорию, попадают в



**Рис. 8.** Распределение значений теплового потока (а); сейсмичности (б); протяженность структурных элементов (в); геолого-геофизический разрез вдоль профиля А–А' (г), (с использованием данных [7]).

Структурные элементы первого порядка (арабские цифры жирным шрифтом) и другие – второго порядка (арабские цифры тонким шрифтом): **1** – Восточно-Баренцовский мегапрогиб (6 – разломно-флексурная зона Седовского блока, 8 – Софроновский жесткий блок добайкальской консолидации); **2** – Центрально-Новоземельский мегантиклиорий (9 – Предновоземельский блок, 10 – Центральный поднятый блок, 11 – Восточнопахтусовский блок, 12 – Пахтусовский блок); **3** – чехол Западно-Сибирской платформы (13 – Приновоземельский поднятый блок).

1 – значения теплового потока,  $\text{mW}/\text{m}^2$  (по [29]); 2 – эпицентры землетрясений, зарегистрированных: а – только станцией NVZ, б – более, чем тремя сейсмическими станциями (см. рис. 1); 3 – гипоцентры землетрясений; 4 – границы структурных элементов; 5–6 – тектонические нарушения (по [7]): 5 – главные: а – достоверные, б – предполагаемые, б – второстепенные: а – достоверные, б – предполагаемые; 7 – сейсмокомплексы мезозойского возраста; 8–12 – палеозойский осадочный чехол (сейсмокомплексы с указанием возраста): 8 – триасовый, 9 – пермский, 10 – кембрийско–пермский, 11 – карбоно–пермский, 12 – силуро–карбонатный; 13–14 – консолидированная кора: 13 – верхняя, 14 – нижняя; 15 – мантия

зону глубинных разломов, связанных с мантийным прогибом, и происходят на глубинах от 20 до 40 км – на границе верхней и нижней коры. Землетрясения 13.06.1995 г., 13.01.1996 г. и 2.05.2017 г. без установленных гипоцентров мы относим к разломам вдольскладчатой системы (см. рис. 8). В пределах прогиба Седова перед Предновоземельским надвигом проявлена форма приразломного структурного клина, к которому приурочено землетрясение 14.03.2006 г.

Опираясь на геолого–геофизические данные, которые мы обобщили для арх. Новая Земля и по-

лучили следующие результаты. Магнитуда землетрясений ( $m_b_{ISC}$ ) за рассматриваемый период 1980–2022 гг. находится в диапазоне от 0.3 до 4.7, в среднем преобладают землетрясения магнитудами 3.2–3.4.

Землетрясения происходят вдоль выявленных разрывных нарушений разного порядка, преимущественно на границе верхней и нижней коры. Процессом подготовки корового землетрясения является накопление в его очаге упругих изгибных сейсмогенных деформаций. Разрядка напряжений происходит при превышении предела



прочности среды, при этом блоки двигаются относительно друг друга, что исключает возможности зарождения очага сильного корового землетрясения, – и здесь триггером могут служить возмущения, распространяющиеся от СОХ.

Влияние возмущений в случае их взаимной корреляции при распространении от хребтов на расстояниях 1300–1500 км в центральной части арх. Новая Земля, где фиксируется наибольшее количество землетрясений, достаточно высокое. По результатам моделирования максимальный совместный вклад энергии распространения возмущений на данных расстояниях может достигать 40–60% от прикладываемых значений возмущений (см. рис. 6).

Таким образом, проведенная нами оценка передаваемых возмущений позволяет нам предположить, что срединно-океанические хребты оказывают значительное влияние на сейсмичность района архипелага Новая Земля.

## ВЫВОДЫ

Наше исследование показало наличие причинно-следственных связей между событиями на СОХ и землетрясениями архипелага Новая Земля.

1. Эпицентры землетрясений коррелируются с глубинными разломами и отражают новейшую тектоническую активность архипелага, возможно, являющуюся следствием развития высокоскоростных неоднородностей в верхней и нижней коре или результатом накопления напряжений и их разрядки в ослабленных зонах.

2. Триггерным механизмом может служить совместная активность арктических рифтовых структур.

3. Временные интервалы, через которые возмущения от срединно-океанических хребтов (СОХ) достигают архипелаг Новая Земля, составляют:

– 1–2 года для геологической системы хребет Книповича–трог Лены;

– 3–5 лет для хребта Гаккеля.

4. Максимальный совместный вклад различных геолого-тектонических структур срединно-океанических хребтов может достигать 40–60% от прикладываемых значений возмущений, что является достаточным условием для разрядки накопившихся напряжений.

**Благодарности.** Выражаем благодарность к.г.-м.н. Д.С. Никитину (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за всестороннюю поддержку в установке сейсмической станции на арх. Новая Земля. Благодарим ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург, Россия) за возможность использования разработанных во ВСЕГЕИ цифровых геологических карт. Авторы признательны рецензенту Е.П. Дубинину (Музей Землеведения МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия) и анонимному рецензенту за

полезные комментарии и редактору М.Н. Шуплецовоу (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, № гос. регистрации 122011300389-8.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков В.Г. Предсказание и наблюдение деформационных волн Земли // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 721–754. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0369>
2. Викулин А.В., Водинчар Г.М., Гусяков В.К., Мелекесцев И.В., Акманова Д.Р., Долгая А.А., Осипова Н.А. Миграция сейсмической и вулканической активности в зонах напряженного состояния вещества наиболее геодинамически активных мегаструктур Земли // Вестн. КамчатГТУ. 2011. Вып. 17. С. 5–15.
3. Виноградов Ю.А., Рыжикова М.И., Петрова Н.В., Пойгина С.Г., Коломиец М.В. Сильные землетрясения земного шара во II полугодии 2022 г. по данным ССД ФИЦ ЕГС РАН // Российский сейсмологический журнал. 2023. Т.5. № 1. С. 7–25. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.1.01>
4. Геология и полезные ископаемые шельфов России (атлас). – Под ред. М.Н. Алексеева – М.: Научный Мир, 2004. 108 л. – ISBN 5-89176-239-0.
5. Дубинин Е.П., Кохан А.В., Суцеская Н.М. Тектоника и магматизм ультрамедленных спрединговых хребтов // Геотектоника. 2013. № 3. С. 3–30. <https://doi.org/10.7868/S0016853X13030028>
6. Егорова Т.П., Павленкова Г.А. Сейсмо-плотностные модели земной коры и верхней мантии Северной Евразии по сверхдлинным сейсмическим профилям “Кварц”, “Кратон” и “Кимберлит” // Физика Земли. 2015. № 2. С. 98–115. <https://doi.org/10.7868/S000233715010044>
7. Зархидзе Д.В., Красножен А.С., Шкарубо С.И., Журавлев В.А., Калугин П.С., Богатырев Л.И., Зуйкова О.Н., Радченко М.С., Богатырева Е.В., Рекант П.В., Зинченко А.Г. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. – М-6 1 : 1 000 000. – 3-е поколение. – Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. – Лист S-39, 40. – Пролив Маточкин Шар. – Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2021. 333 с. <https://www.geokniga.org/sites/geokniga/files/mapcomments/s-3940-prol-matochkin-shar-gosudarstvennaya-geologicheskaya-karta-rossiysko.pdf>
8. Казанкова Э.Р., Корнилова Н.В. Геодинамика Баренцево-Карского региона с позиции ротационной тектоники // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Т. 20. № 1. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-20.art34>
9. Картографическая и аналитическая платформа ArcGis [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.geocentre-consulting.ru/products/index?section=77> (Дата обращения 01.10.2023).
10. Кораго Е.А., Чухонин А.П. Гранитоидные формации Новой Земли // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1988. № 10. С. 28–35.
11. Кораго Е.А., Ковалева Г.Н., Щеколдин Р.А., Ильин В.Ф., Гусев Е.А., Крылов А.А., Горбунов Д.А. Геологическое строение архипелага Новая Земля (запад рос-

- сийской Арктики) и особенности тектоники евразийской Арктики // Геотектоника. 2022. № 2. С. 21–57.  
<https://doi.org/10.31857/S0016853X22020035>
12. *Кораго Е.А., Тимофеева Т.Н.* Магматизм Новой Земли (в контексте геологической истории Баренцево-Северокарского региона). — СПб.: 2005, 225 с. (Тр. ВНИИОкеангеология. Т. 209).
  13. *Кохан А.В.* Морфология рифтовых зон ультрамедленного спрединга (хребты Рейкьянес, Книповича и Гаккеля) // Вестн. МГУ. Сер. 5: География. 2013. № 2. С. 61–69.
  14. *Кохан А.В., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л., Абрамова А.С.* Кинематика и особенности морфоструктурной сегментации хребта Книповича // Океанология. 2012. Т. 52. № 5. С. 1–13.
  15. *Кочарян Г.Г.* Геомеханика разломов. — Под ред. В.В. Адушкина — М.: ГЕОС, 2016. 424 с.
  16. *Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика и медленные деформационные волны // Физика Земли. 2020. № 4. С. 172–182.  
<https://doi.org/10.31857/S0002333720040055>
  17. *Лобковский Л.И., Гарагаш И.А., Алексеев Д.А.* Трехмерная модель напряженно-деформированного состояния литосферы арктического региона для современной эпохи // Бюл. МОИП. Отд. Геол. 2018. Т. 93. Вып. 4. С. 19–26.  
<https://doi.org/10.25633/ETN.2018.12.08>
  18. *Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Евтюгина З.А.* Шкала L 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>
  19. *Морозов В.Н., Каган А.И., Татаринов В.Н.* Геодинамические аспекты радиационной безопасности на архипелаге Новая Земля // Горный информ.-аналитич. бюлль. 2015. № 9. С. 205–2219.
  20. *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.
  21. *Никитин Д.С., Хуторской М.Д., Иванов Д.А., Горских П.П.* Глубинное строение и нефтегазосность северо-восточной части Баренцевоморского шельфа. — Отв. ред. К.Е. Дегтярев — М.: ГЕОС, 2020. 146 с.
  22. *Павлов С.П., Ступакова А.В., Мусин М.В. и др.* Создание каркасной сети региональных сейсмических профилей с целью изучения строения глубоких горизонтов осадочного чехла Печоро–Баренцево–Северокарского мегабассейна (Печорский, Южно-Баренцевский районы) — Мурманск: МАГЭ, 2011. 5 кн. 1067с.
  23. *Петрова Н.В., 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>
  24. *Программный комплекс EL (ELRESS).* — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.krsc.ru/?q=ru/EL> (Дата обращения 10.07.2023).
  25. *Рослов Ю.В., Сакулина Т.С., Верба М.Л. и др.* Комплексные морские работы с целью получения новой информации о структуре осадочного чехла Баренцева и Карского морей. — (Морской фил. ФГБУ “Росгеолфонд”. Территориальный уровень. Инв. № F2407). — СПб.: ГНПП “Севморгео”, 2004. 260 с. <https://rfgf.ru/catalog/docview.php?did=05dce36469648c97d19ff3ed9e28778a>
  26. *Сакулина Т.С., Рослов Ю.В., Павленкова Г.А.* Методы и результаты обработки комплексных сейсмических исследований по профилю 2-АР (Баренцево-Карский шельф) // Физика Земли. 2009. № 3. С. 56–63.
  27. *Тектоническая карта:* Тектоническая карта Арктики. — М-6: 1 : 10000000.— Под ред.: *О.В. Петрова*, М. Пубелье — СПб.: ВСЕГЕИ, 2019. [https://www.geokniga.org/maps/additional/tect\\_Arctic-map.pdf](https://www.geokniga.org/maps/additional/tect_Arctic-map.pdf).
  28. *Уникальная научная установка “Архангельская сейсмическая сеть”.* — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://fciactic.ru/index.php?page=geoss> (Дата обращения 30.09.2023).
  29. *Хуторской М.Д., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Кременецкая Е.О., Кваерна Т.* Сейсмичность, тепловой поток и тектоника Западно-Арктического бассейна // Мониторинг. Наука и технологии. 2015. Т.24. № 3 С. 6–15.
  30. *Хуторской М.Д., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Тевелева Е.А.* Сейсмичность и тепловой поток в обрамлении Восточно-Европейской платформы // Вулканология и сейсмология. 2022. № 2. С. 74–92.  
<https://doi.org/10.31857/S0203030622020043>
  31. *Хуторской М.Д., Ахмедзянов В.Р., Ермаков А.В. и др.* Геотермия арктических морей. — Отв. ред. Ю.Г. Леонов — М.: ГЕОС, 2013. 232 с.
  32. *Хуторской М.Д., Леонов Ю.Г., Ермаков А.В., Ахмедзянов В.Р.* Аномальный тепловой поток и природа желобов в северной части Свальбардской плиты // ДАН. 2009. Т. 424. № 2. С. 227–233.
  33. *Шерман С.И.* Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. — Отв. ред. Г.А. Соболев — Новосибирск: Гео, 2014. 359 с.
  34. *Antonovskaya G.N., Basakina I.M., Vaganova N.V., Kapustian N.K., Konechnaya Ya.V., Morozov A.N.* Spatio-temporal relationship between Arctic Mid-Ocean Ridge system and intraplate seismicity of the European Arctic // Seismol. Res. Lett. 2021. Vol. 92. P. 2876–2890.  
<https://doi.org/10.1785/0220210024>
  35. *Arctic Petroleum Geology.* — Ed.by A.M. Spencer, A.F. Embry, D.L. Gautier, A.V. Stupakova, K. Sørensen — (Geol. Soc. London. GB. 2011. Geol. Soc. Mem. No. 35), pp. 661.  
<https://doi.org/10.1144/M35.0>
  36. *Carslaw H.S., Jaeger J.C.* Conduction of heat in solids. // J. Engineering Materials and Technology. 1989. Vol. 108. P. 378–378,  
<https://doi.org/10.1115/1.3225900>
  37. *Davies J.H., Davies D.R.* Earth’s surface heat flux // Solid Earth. 2010. Vol. 1. P. 5–24.
  38. *Elsasser W.M.* Convection and stress propagation in the upper mantle. — In: *Application of Modern Physics to the Earth and Planetary Interiors.* — Ed. by *S.K. Runcorn*, (Wiley-Intersci., NY, USA. 1969). P. 223–246.
  39. *Fjeldskaar W.* What about the asthenosphere viscosity? Comment on “Sea-level change, glacial rebound and mantle viscosity for northern Europe” by K. Lambeck, C. Smither and P. Johnston // Geophys. J. Int. 2000.

- Vol. 142. № 1. P. 277–278.  
<https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00126.x>
40. *Hutchinson M.F.* A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // *J. Hydrol.* 1989. Vol. 106. № 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)
  41. *Hutchinson M.F., Xu T., Stein J.A.* Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure. – In: *Geomorphometry*. – Ed. by *T. Hengel, I.S. Evans, J.P. Wilson, M. Gould*, (Redlands, California, USA, 2011). P. 19–22.
  42. ISC Bull. [Electronic resource], <http://www.isc.ac.uk/isbulletin/search/bulletin/> (Accessed July 10, 2023).  
<https://doi.org/10.31905/D808B830>
  43. *Kim W.-Y., Ottemöller L.* Regional Pn body-wave magnitude scale mb(Pn) for earthquakes along the northern mid-Atlantic Ridge // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2017. Vol. 122. P. 10,321–10,340.  
<https://doi.org/10.1002/2017JB014639>
  44. *Klitzke P., Faleide J. I., Scheck-Wenderoth M., Sippel J.* A lithosphere-scale structural model of the Barents Sea and Kara Sea region // *Solid Earth.* 2015. Vol. 6. P. 153–172.  
<https://doi.org/10.5194/se-6-153-2015>
  45. *Kværna T., Dando B.D.E., Gibbons S.J.* Seismic monitoring of Novaya Zemlya: Progress, challenges and prospects // *Seismol. Res. Lett.* 2023. Vol. 94. № 3. P. 1495–1508.  
<https://doi.org/10.1785/0220220338>
  46. *Marsan D., Bean C.J.* Seismicity response to stress perturbations analyzed for a world-wide catalogue // *Geophys. J. Int.* 2003. Vol. 154. P. 179–195.
  47. *Morozov A.N., Asming V.E., Vaganova N.V., Konechnaya Ya.V., Mikhaylova Ya.A., Evtyugina Z.A.* Seismicity of the Novaya Zemlya archipelago: Relocated event catalog from 1974 to 2014 // *J. Seismol.* 2017. Vol. 21. № 6. P. 1439–1466.  
<https://doi.org/10.1007/s10950-017-9676-y>
  48. *Morozov A.N., Vaganova N.V., Mikhailova Ya.A., Starikov I.V.* Unification of magnitudes for modern earthquakes in the Eurasian Arctic region // *Seismic Instruments.* 2022. Vol. 58. № 4. P. 389–397,  
<https://doi.org/10.3103/S0747923922040077>
  49. *Pollitz F.F., Burgmann R., Romanowicz B.* Viscosity of oceanic asthenosphere inferred from remote triggering of earthquakes // *Science.* 1998. Vol. 280(5367). P. 1245–9. PMID: 9596574.  
<https://doi.org/10.1126/science.280.5367.1245>
  50. *Priestley K., McKenzie D.* The relationship between shear wave velocity, temperature, attenuation and viscosity in the shallow part of the mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2013. Vol. 381. P. 78–91.
  51. *Skordas E.S., Meyer K., Olson R., Kulhanek O.* Causality between interplate (North Atlantic) and intraplate (Fennoscandia) seismicities // *Tectonophysics.* 1991. Vol. 185. № 3–4. P. 295–307.  
[https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90450-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90450-7)
  52. Spatial Analyst Tools – Topo to Raster, <http://https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/topo-to-raster> (Accessed October 1, 2023).
  53. *The Global Heat Flow Database* [Electronic resource], <https://www.ihfc-iugg.org/products/global-heat-flow-database> (Accessed September 30, 2023).
  54. *Velicogna I., Wahr J.* Postglacial rebound and Earth's viscosity structure from GRACE // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107. № B12. P. 2376.  
<https://doi.org/10.1029/2001JB001735>
  55. *Vorobieva I.A., Gvishiani A.D., Shebalin P.N., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Skorkina A.A., Sergeeva N.A., Fomenko N.A.* Integrated Earthquake Catalog II: The Western sector of the Russian Arctic // *Applied Sciences.* 2023. Vol. 13. № 7084.  
<https://doi.org/10.3390/app13127084>
  56. *Yang X., North R., Romney C., Richards P.G.* Worldwide nuclear explosions // *Int. Geophysics.* 2003. Vol. 81. P. 1595–1599.

## Influence of Mid-Oceanic Ridges on Seismicity of Novaya Zemlya Archipelago

G. N. Antonovskaya<sup>a, \*</sup>, Ya. V. Konechnaya<sup>a, b</sup>, I. M. Basakina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 163020 Arkhangelsk, Arkhangelsk Oblast, Russia*

<sup>b</sup>*Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 294034 Obninsk, Kaluga Oblast, Russia*

\**e-mail: essm.ras@gmail.com*

The influence of the mid-oceanic ridges (MOR), including the Gakkel Ridge and the geological system Knipovich Ridge–Trough Lena, on the seismicity of the Novaya Zemlya archipelago area for 1980–2022 is considered. For each geological element under consideration, we compiled seismic catalogs with a single unified magnitude  $m_{ISC}$  for an equivalent comparison of information, and the annual seismic energy was calculated, and graphs of its distribution by year were constructed. We performed analytical modeling based on the Elsasser model describing the process of local stress transfer in a rigid elastic lithosphere underlain by a viscous asthenosphere, and made quantitative calculations of the disturbance propagations from MOR. The time intervals through which disturbances from MOR reach the Novaya Zemlya archipelago are 1–2 years for the geological system Knipovich Ridge–Trough Lena and 3–5 years for the Gakkel Ridge. The maximum joint contribution to the level of seismic activity of various geological and tectonic structures of the MOR can reach 40–60% of the applied disturbances values, which is a sufficient condition for the influence on seismicity of the Novaya Zemlya orogen. The most geodynamical active structures and zones of concentration of tectonic stresses are identified.

**Keywords:** Novaya Zemlya archipelago, seismicity, mid-ocean ridges, tectonic processes, transmission of disturbances