



## CONTRIBUTION OF THE LARGE-SCALE RESEARCH FACILITIES "ARKHANGELSK SEISMIC NETWORK" TO THE RUSSIAN ARCTIC SEISMICITY STUDY

G.N. Antonovskaya , Y.V. Konechnaya ✉, N.V. Vaganova , I.M. Basakina , A.N. Morozov ,  
E.V. Shakhova , Y.A. Mikhaylova , K.B. Danilov 

Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 23 Northern Dvina Emb, Arkhangelsk 163000, Russia

**ABSTRACT.** The article presents a Large-Scale Research Facilities "Arkhangelsk seismic network". The configuration, technical equipment, methods of processing earthquakes on the platform and the Russian part of the Arctic are presented. The actual results of the Large-Scale Research Facilities "Arkhangelsk Seismic Network" are discussed.

**KEYWORDS:** western Russian Arctic; seismic monitoring; earthquake; seismic catalog; seismicity

**FUNDING:** The work was supported by the state budget funds for the research topic No. 122011300389-8 of the Laboratory of Seismology of the Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research UrB RAS.

### SHORT COMMUNICATION

**Correspondence:** Yana V. Konechnaya, [yanakon@mail.ru](mailto:yanakon@mail.ru)

Received: December 7, 2021

Revised: December 20, 2021

Accepted: December 30, 2021

**FOR CITATION:** Antonovskaya G.N., Konechnaya Ya.V., Vaganova N.V., Basakina I.M., Morozov A.N., Shakhova E.V., Mikhaylova Ya.A., Danilov K.B., 2022. Contribution of the Large-Scale Research Facilities "Arkhangelsk Seismic Network" to the Russian Arctic Seismicity Study. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0587. doi:10.5800/GT-2022-13-2-0587

## ВКЛАД УНИКАЛЬНОЙ НАУЧНОЙ УСТАНОВКИ «АРХАНГЕЛЬСКАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ СЕТЬ» В ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Г.Н. Антоновская, Я.В. Конечная, Н.В. Ваганова, И.М. Басакина, А.Н. Морозов,  
Е.В. Шахова, Я.А. Михайлова, К.Б. Данилов

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лаврова УрО РАН, 163000, Архангельск, наб. Северной Двины, 23, Россия

**АННОТАЦИЯ.** В статье представлена уникальная научная установка «Архангельская сейсмическая сеть»: ее конфигурация, техническое оснащение, методики обработки платформенных землетрясений, землетрясений российской части Арктики и прилегающих территорий, а также основные результаты ее работы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** западный сектор Российской Арктики; сейсмический мониторинг; землетрясение; сейсмический каталог; сейсмичность

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы НИР лаборатории сейсмологии ФИЦКИА УрО РАН № 122011300389-8.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Научные исследования, выполняемые на базе уникальной научной установки «Архангельская сейсмическая сеть» (УНУ «АСС»), ориентированы на мониторинг сейсмической обстановки западного сектора Российской Арктики, защиту национальных интересов при освоении Арктики, мониторинг возникновения катастрофических, в первую очередь сейсмических и инициируемых ими природных, явлений (оползни, обвалы, горно-тектонические удары), сейсмический мониторинг хребта Гаккеля и прилегающих котловин.

Архангельская сейсмическая сеть (АСС) создана в 2003 г. на базе Института экологических проблем Севера УрО РАН (в настоящее время ФИЦКИА УрО РАН) по инициативе чл.-корр. РАН Ф.Н. Юдахина, при поддержке академика РАН Н.П. Лаврова и при участии ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» (ЕГС РАН). В настоящее время сеть включает в себя девять сейсмических станций, две из которых находятся на совместном обслуживании с ЕГС РАН – «Климовская» и «Андозеро». В 2013 г. АСС получила международный код АН в системе International Federation of Digital Seismograph Networks (<http://www.fdsn.org/networks/>), в 2014 г. зарегистрирована в качестве уникальной научной установки. С 2014 г. сейсмические станции Архангельской сети регистрируются в Международном сейсмологическом центре (ISC) (<https://doi.org/10.31905/EL3FQQ40>), составленные бюллетени о землетрясениях Арктики передаются в центр для дальнейшей обработки и участия в глобальном сейсмическом мониторинге. Современная конфигурация УНУ «АСС» представлена на [рис. 1](#), параметры сейсмических станций и аппаратуры приведены в [табл. 1](#).

По данным УНУ «АСС» создаются сейсмические каталоги, уточняется строение литосферы и верхней мантии [Morozov et al., 2015; Vaganova et al., 2018], строятся региональные годографы [Morozov, Vaganova, 2017], что позволяет, например, повысить точность локации

арктических землетрясений, а также выполнить релокацию эпицентров исторических землетрясений Арктики и севера Восточно-Европейской платформы (ВЕП) [Morozov et al., 2018b, 2020b]. Результаты важны для сейсмического районирования морских арктических акваторий Российской Федерации, освоение которых уже начато, а также материковых территорий, перспективных для промышленного освоения.

### 2. МЕТОДЫ

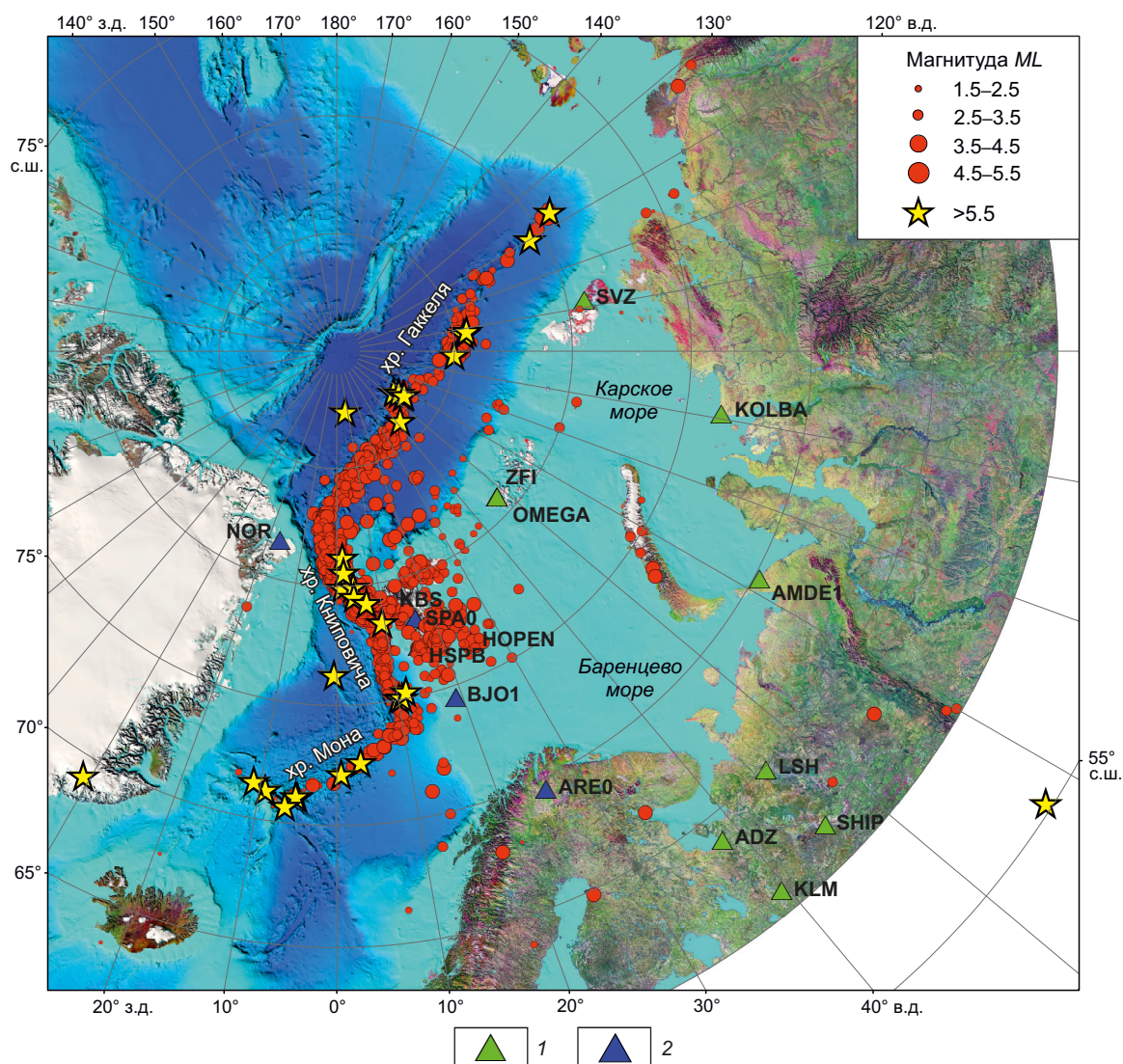
Рутинная обработка исходных данных УНУ «АСС» с целью получения параметров очагов проводится в программном комплексе WSG (Windows Seismic Grafer) совместной разработки ЕГС РАН и НПП «Геотех» [Aki-mov, Krasilov, 2020]. Для минимизации ошибки в определении координат эпицентров дополнительно привлекаются исходные данные сейсмических станций, функционирующих на архипелаге Шпицберген и севере Скандинавии. Их расположение показано на [рис. 1](#). Доступ к данным осуществляется с помощью электронного ресурса GEOFON (<https://geofon.gfz-potsdam.de/>). УНУ «АСС» также обменивается своими данными и с соседними сетями – Кольского филиала ЕГС РАН, Института геологии КарНЦ РАН (г. Петрозаводск), Горного института УрО РАН (г. Пермь), Института геологии имени академика Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар) и др.

Для определения координат землетрясений и времени в очаге используется скоростная модель BARENTS (разработка Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН [Kremenetskaya et al., 2001]) и скоростная модель NOES [Morozov, Vaganova, 2017] (разработка лаборатории сейсмологии ФИЦКИА УрО РАН). Для определения значений локальной магнитуды  $M_L$  используется уточненная шкала для западной части Евразийской Арктики [Morozov et al., 2020a].

Формальные ошибки определения эпицентров зависят от количества станций, включенных в обработку,

**Таблица 1.** Параметры сейсмических станций УНУ «АСС»**Table 1.** Parameters of seismic stations of the Large-Scale Research Facilities "Arkhangelsk Seismic Network"

Код станции в УНУ «АСС»/ISC	Название станции	$\varphi$ , °N	$\lambda$ , °E	h, м	Дата открытия	Тип аппаратуры на 2021 г.	Группы каналов
ADZ/ADZR	Андозеро	63.92	38.28	51	Ноябрь 2015 г.	CMG-3ESP +Centaur	HHZ, HHN, HNE
AMDE1/AMDE1	Амдерма1	69.72	61.66	40	Ноябрь 2010 г.	Trillium Compact 120s +Centaur	HHZ, HHN, HNE
KLM/KLMR	Климовская	60.85	39.51	157	Ноябрь 2004 г.	CM3-OC, CM3-KB +SDAS	BHZ, BHN, BHE, SHZ, SHN, SHE
KOLBA/KOLBA	Колба	73.53	80.70	11	Октябрь 2020 г.	Trillium Compact 120s +Centaur	HHZ, HHN, HNE
LSH/LSH	Лешуконское	64.87	45.73	60	Октябрь 2006 г.	CMG-3ESP +GSR-24	BHZ, BHN, BHE
OMEGA/OMEGA	Омега	80.78	47.73	24	Август 2015 г.	CMG-3T + DM-24	BHZ, BHN, BHE
SHIP/SHIP	Среднее Шипицыно	61.61	45.90	68	Август 2019 г.	CMG-40T + Centaur	SHZ, SHN, SHE
SVZ/SVZ	Северная Земля	79.27	101.65	22	Ноябрь 2016 г.	CMG-40TDE	BHZ, BHN, BHE
ZFI2/ZFI2	Земля Франца-Иосифа2	80.80	47.65	18	Сентябрь 2011 г.	Trillium Compact 120s +Centaur	BHZ, BHN, BHE

**Рис. 1.** Сейсмичность Арктики по данным мониторинга УНУ «АСС» за 2017–2021 гг.

1 – сейсмические станции УНУ «АСС»; 2 – станции зарубежных сейсмических сетей, волновые формы которых привлекаются для обработки сейсмических событий.

**Fig. 1.** Seismicity of the Arctic according to the data of the Large-Scale Research Facilities "Arkhangelsk seismic Network" for 2017–2021.

1 – seismic stations of the Large-Scale Research Facilities "Arkhangelsk Seismic Network"; 2 – foreign seismic stations whose data are used to process seismic events.

и их пространственного расположения относительно эпицентра и для районов Арктики в среднем составляют до 50 км, но при исключительно неблагоприятных условиях локации могут достигать первых сотен километров. Вопросы определения глубин стоят очень остро, остаются сложными и актуальными, и на сегодняшний день глубина землетрясений в повседневной рутинной обработке не определяется, а фиксируется на значении 10 км для региональных событий и 5 км – для локальных событий. Но тут следует отметить, что при решении конкретных научных задач всегда проводится уточнение параметров гипоцентров с определением диапазона возможных глубин и наиболее вероятных глубин. Так, если рассматривать землетрясения севера ВЕП и района архипелага Новая Земля, то интервал глубин их очагов преимущественно составляет от 0 до 40 км [Antonovskaya et al., 2021] и зависит от структурно-тектонических условий территорий.

Уточнение параметров сейсмических событий производится методом Generalized beamforming [Kvaerna, Ringdal, 1996], реализованы в усовершенствованном виде в программе NAS (New Association System) [Asming, Prokudina, 2016; Fedorov et al., 2019], с определением глубины очага землетрясений и эллипса ошибок.

Механизмы очагов арктических землетрясений в повседневной рутинной обработке не определяются ввиду того, что эпицентры, как правило, удалены от станций на расстояния от 500 до 1000 км, при которых на записях сложно выделить знаки первых движений. В случаях же, когда условия локации позволяют, фокальные механизмы очагов определяются, например у землетрясения в Архангельской области 28.03.2013 г. [Morozov et al., 2018b].

Нередкими являются ситуации, когда низкомагнитудные землетрясения регистрируются только одной станцией. В этом случае используется метод определения координат эпицентров землетрясений по записям одной станции, реализованный в программе EL (Event Locator) [ELRESS, 2021]. Для минимизации возможной ошибки в определении координат таких эпицентров анализируются только землетрясения с четкими вступлениями фаз P и S, т.е. с высоким значением «сигнал/шум». Конечно, это менее достоверный способ локации, однако по его результатам можно определить основные закономерности пространственного распределения эпицентров.

Методом приемных функций [Vinnik et al., 1977; Farra, Vinnik, 2000], по записям станций УНУ «АСС», изучается глубинная структура земной коры и верхней мантии в окрестностях станций, проводится моделирование скоростных моделей  $V_p$  и  $V_s$  до глубины 300 км, выявляются особенности глубинного строения в районах с разными структурно-тектоническими условиями, с разными типами земной коры [Vaganova, 2019].

Для исследований влияния океанических хребтов на сейсмичность шельфовых и платформенных территорий в программе NAS были уточнены параметры эпицентров землетрясений из района архипелага Новая

Земля, севера ВЕП и северной части Уральского складчатого пояса (УСП) за период 1980–2019 гг. [Antonovskaya et al., 2021]. Основные данные о сейсмичности были взяты из каталога ISC [Bulletin..., 2021] и дополнены каталогом лаборатории сейсмологии ФИЦ КИА УрО РАН. По данным сейсмического каталога получено распределение годового выделения сейсмической энергии для северной окраины срединно-океанического хребта (СОХ) в целом, отдельно для хребтов Мона и Гаккеля, для сегмента хребет Книповича – трог Лены, для архипелага Новая Земля и для района, включающего в себя северные окраины ВЕП и УСП. Для сглаживания результирующих распределений годовой сейсмической энергии была применена процедура скользящего среднего с использованием пятилетнего интервала.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведены результаты сейсмического мониторинга Арктики за 2017–2021 гг. по данным УНУ «АСС» с привлечением волновых форм ряда станций зарубежных сейсмических сетей. Ежегодно станциями УНУ «АСС» регистрируется более 1000 сейсмических событий различной природы, произошедших в западном секторе Российской Арктики и на сопредельных территориях. Представительный уровень магнитуды за последние пять лет для показанного на рис. 1 района составляет  $M_{L, пред} = 3.5$ .

Для исследований влияния океанических хребтов на сейсмичность шельфовых и платформенных территорий составлен каталог за 1980–2019 гг. Выбор временного промежутка обусловлен тем, что количество и расположение сейсмических станций в Европейской Арктике стали удовлетворительными для надежного определения параметров землетрясений. Также получен сейсмический каталог с уточненными параметрами землетрясений для районов архипелага Новая Земля и северной окраины ВЕП [Antonovskaya et al., 2021].

Возмущения, создаваемые силами отталкивания в районах СОХ, могут достигать архипелага Новая Земля и северной окраины ВЕП за временной интервал от 3 до 8 лет [Antonovskaya et al., 2021].

### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено обобщение информации о существующих разрывных нарушениях для Баренцево-Карского региона и северной окраины ВЕП по данным [Aleksiev, 2004; Spencer et al., 2011; Petrov, Pubellier, 2019] и сопоставление ее с сейсмическим каталогом за 1980–2021 гг. (рис. 2). Геолого-геофизические исследования на территории шельфа российской части Арктики проводились с разной плотностью; как результат, многие очаги сейсмических событий попадают на «белые зоны».

На рис. 2 зеленым цветом показаны землетрясения, зарегистрированные одиночной станцией, которые дополняют представления о сейсмичности рассматриваемого региона, даже с учетом небольшой точности

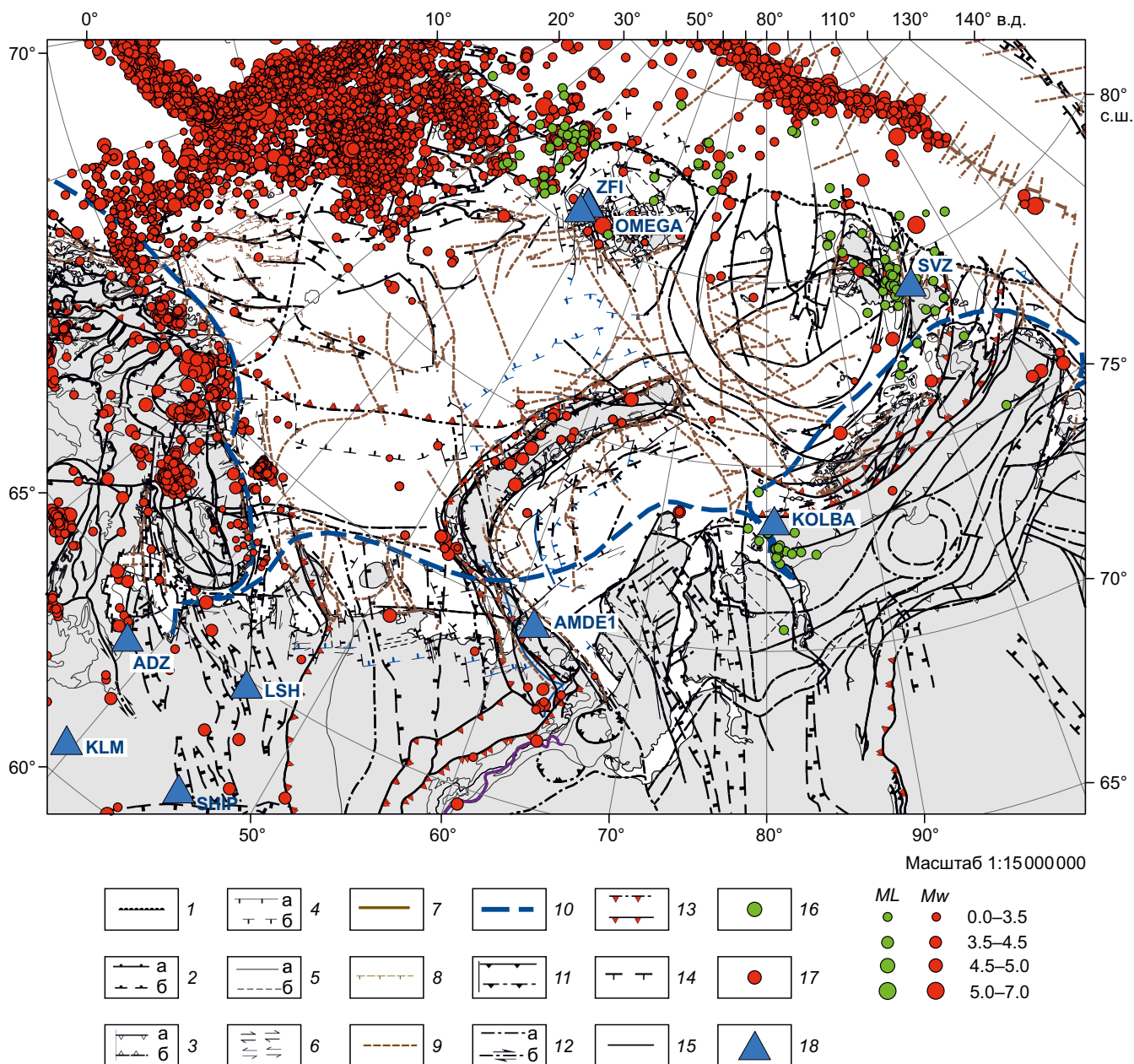


Рис. 2. Сейсмичность шельфовых территорий за 1980–2020 гг.

1 – кромка шельфа. (2–5) – новейшие разломы по [Alekseev, 2004]: черные – активные (поздний неоплейстоцен – голоцен); синие – (поздний плиоцен – средний неоплейстоцен): а – достоверные, б – предполагаемые; 2 – сбросы, штрихи на опущенном крыле, 3 – взбросы, треугольники на приподнятом крыле, 4 – разломы неустановленного типа, штрихи на опущенном крыле, 5 – разломы без установленного смещения; 6 – стрелками показано направление смещения при сдвигах. (7–9) – разломы по [Spencer et al., 2011]: 7 – активный спрединговый центр, 8 – нормальные разломы, 9 – неклассифицированные разломы; 10 – Северный морской путь. (11–15) – разломы по [Petrov, Pubellier, 2019]: 11 – надвиг и взброс, 12 – сдвиговый сброс (стрелка – направление сброса), 13 – фронт деформаций для орогенов, 14 – нормальные листрические разломы, 15 – неклассифицированные разломы; 16 – события по одной станции; 17 – землетрясения из сейсмического каталога 1980–2021; 18 – станции УНУ «АСС».

Fig. 2. Seismicity of the shelf sea area for 1980–2020.

1 – shelf edge. (2–5) – recent faults from [Alekseev, 2004]: black – active (Late Neo-Pleistocene – Holocene); blue – (Late Pliocene – Middle Pleistocene): a – determined, b – inferred; 2 – normal faults, dashed – subsided wing, 3 – thrusts, triangles – raised wing, 4 – undetermined type, dashed – subsided wing, 5 – unknown displacement; 6 – strike-slips (arrows – displacement direction). (7–9) – faults from [Spencer et al., 2011]: 7 – active spreading center, 8 – normal faults, 9 – unclassified faults; 10 – The Northern Sea Route. (11–15) – faults from [Petrov, Pubellier, 2019]: 11 – overthrusts and reverse faults, 12 – strike-slip (arrow shows offset), 13 – deformation front of orogeny, 14 – normal listric faults, 15 – unclassified faults; 16 – seismic events identified by a single station; 17 – earthquakes from the seismic catalog of 1980–2020; 18 – seismic stations of the Large-Scale Research Facilities "Arkhangelsk seismic Network".

их локации. Например, благодаря открытию станции «Колба» в составе УНУ «АСС» появилась возможность регистрации сейсмических событий в Карском море.

Анализ рис. 2 подтверждает слабую сейсмичность континентальной части Евразийской плиты. Заметная сейсмическая активность проявляется на севере Баренцевоморского шельфа, который характеризуется малой мощностью литосферы и большой раздробленностью континентального склона. Прослеживается четкая приуроченность эпицентров землетрясений к рифтогенным грабенам шельфа. Значения локальных магнитуд  $ML$  варьируются от 0.7 до 4.5.

Небольшое количество событий приходится на Хинлопен-Ольгинский грабен. Роевая сейсмичность наблюдается вокруг о. Белый, часть землетрясений имеет магнитуду 1.6–3.0. Некоторые события приурочены к границе грабена Франц-Виктория, поднятиям островов Белый и Виктория в районе выделения неотектонических разломов. Сгущение эпицентров событий наблюдается в устьевой части грабена на границе континентального шельфа.

Архипелаг Земля Франца-Иосифа (арх. ЗФИ) расчленен неотектоническими разломами, эпицентры сейсмических событий ложатся на разломы вокруг архипелага. Небольшая часть землетрясений зафиксирована в районе грабена Святой Анны, их эпицентры приурочены к бортам грабена и центральной зоне его устьевой части. Локальная магнитуда определена лишь для единичных событий и составляет 1.1–2.7. Сильнейшее землетрясение в районе арх. ЗФИ по историческим данным имеет магнитуду 6.6 [Morozov et al., 2018a]. На шельфе в районе арх. ЗФИ мощность коры снижена до 25–26 км. Это маломощная кора шельфовых морей. Наблюденное утонение консолидированной коры является признаком образования рифтогенных структур, связанных с растяжениями земной коры в условиях континентального рифтогенеза и перехода континентальной коры в океаническую.

Интересен с точки зрения сейсмичности район архипелага Северная Земля и п-ова Таймыр. Благодаря установленной на архипелаге станции SVZ стал возможен мониторинг современной слабой сейсмичности этого района. Большинство землетрясений здесь регистрируется в устьевой части Хатангского залива, в Хатангском грабене, где берет начало Хатангско-Ломоносовская краевая зона континентальных разломов, и на востоке Таймырского полуострова. Фиксируются также слабые события с  $ML$  от 0.6 до 2.3 на юге о-ва Октябрьской Революции, предположительно вызванные процессами разрушения крупных ледников [Morozov et al., 2021].

Восточная окраина Балтийского щита и северные прогибы ВЕП отмечаются мощной, более 200 км, холодной литосферой, земной корой континентального типа мощностью 40 км и сравнительно тонким, вплоть до выклинивания, осадочным слоем. В сейсмологическом плане встречаются единичные слабые землетрясения на границах крупных тектонических структур

[Antonovskaya et al., 2021]. Магнитуда составляет от 0.8 до 3.4.

На основе составленного сейсмического каталога за 1980–2021 гг. показано, что землетрясения, происходящие на северных шельфовых и платформенных территориях, связаны с геодинамикой СОХ арктической зоны [Antonovskaya et al., 2021]. Явление вызвано распространением тектонических напряжений, создающих дополнительную нагрузку в литосфере. На сейсмичность платформенных и шельфовых территорий помимо таких факторов, как частичный сброс напряжений вследствие региональной геодинамики, постледниковой разгрузки, индуцированной сейсмичности и ряд других, оказывает влияние и совместная деятельность арктических рифтовых структур. Были выделены временные интервалы, за которые возмущения, создаваемые силами отталкивания в районах СОХ, могут достигать архипелага Новая Земля и северной окраины ВЕП.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Весомый вклад УНУ «АСС» в сейсмический мониторинг Российской Арктики является бесспорным, на сегодняшний день сеть – безоговорочный лидер в мониторинге сейсмической обстановки Арктики и Северного морского пути. Новая информация углубляет знания о проявлении современной сейсмичности на шельфовых и платформенных территориях, которую необходимо учитывать при проектировании ответственных объектов.

## 6. ДАННЫЕ И РЕСУРСЫ

Информация об УНУ «Архангельская сейсмическая сеть» доступна на официальном сайте «Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации» (<https://ckp-rf.ru/usu/>), а также на официальном сайте ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН (<http://fciactic.ru/index.php?page=geoss>).

## 7. БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов выражает благодарность сотрудникам Единой Геофизической службы РАН за совместное обслуживание двух сейсмических станций.

## 8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

## 9. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## 10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Akimov A.P., Krasilov S.A., 2020. Program Complex WGS "System of Processing of Seismic Data". Certificate of State Registration of Computer Programs № 2020664678 of November 16, 2020. ROSPATENT (in Russian) [Акимов А.П., Красилов С.А. Программный комплекс WGS «Система обработки сейсмических данных»: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020 664678 от 16.11.2020. РОСПАТЕНТ, 2020].
- Alekseev M.N. (Ed.), 2004. Atlas "Geology and Mineral Resources of the Russian Shelf Areas". Nauchny Mir, Moscow, 279 p.
- Antonovskaya G.N., Basakina I.M., Vaganova N.V., Kapustian N.K., Konechnaya Y.V., Morozov A.N., 2021. Spatiotemporal Relationship between Arctic Mid-Ocean Ridge System and Intraplate Seismicity of the European Arctic. *Seismological Research Letters* 92 (5), 2876–2890 <https://doi.org/10.1785/0220210024>.
- Asming V., Prokudina A., 2016. System for Automatic Detection and Location of Seismic Events for Arbitrary Seismic Station Configuration NSDL. In: Abstracts of the 35th General Assembly of the European Seismological Commission (September 4–10, 2016, Sgonico, Italia). ESC, 373.
- Bulletin of the International Seismological Centre, 2021. Available from: <https://doi.org/10.31905/D808B830> (Last Accessed December 3, 2021).
- ELRESS, Event Locator Seismological Software, 2021. Available from: <http://www.krsc.ru/?q=en/EL> (Last Accessed December 3, 2021).
- Farra V., Vinnik L., 2000. Upper Mantle Stratification by P and S Receiver Functions. *Geophysical Journal International* 141 (3), 699–712. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00118.x>.
- Fedorov A.V., Asming V.E., Jevtjugina Z.A., Prokudina A.V., 2019. Automated Seismic Monitoring System for the European Arctic. *Seismic Instruments* 55, 17–23. <https://doi.org/10.3103/S0747923919010067>.
- Kremenetskaya E., Asming V., Ringdal F., 2001. Seismic Location Calibration of the European Arctic. *Pure and Applied Geophysics* 158, 117–128. <https://doi.org/10.1007/PL00001151>.
- Kvaerna T., Ringdal F., 1996. Generalized Beamforming, Phase Association and Threshold Monitoring Using a Global Seismic Network. In: E.S. Husebye, A.M. Dainty (Eds). *Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty*. Vol. 303. Springer, Dordrecht, p. 447–466. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-0419-7\\_24](https://doi.org/10.1007/978-94-011-0419-7_24).
- Morozov A.N., Vaganova N.V., 2017. The Travel Times of Regional P and S for Spreading Ridges in the European Arctic. *Journal of Volcanology and Seismology* 11, 156–163. <https://doi.org/10.1134/S0742046317020051>.
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Evtyugina Z.A., 2020a. The ML Scale in Western Eurasian Arctic. *Russian Journal of Seismology* 2 (4), 63–68 (in Russian) [Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Евтюгина З.А. 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>.
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Konechnaya Ya.V., Evtyugina Z.A., 2018a. The Instrumental Seismicity of the Barents and Kara Sea Region: Relocated Event Catalog from Early Twentieth Century to 1989. *Journal of Seismology* 22, 1171–1209. <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9760-y>.
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Mikhailova Ya.A., 2018b. Seismicity of the North of the Russian Plate: Clarification of the Parameters of Hypocenters of Modern Earthquakes. *Physics of the Earth* 2, 104–123 (in Russian) [Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Михайлова Я.А. Сейсмичность севера Русской плиты: уточнение параметров гипоцентров современных землетрясений // Физика Земли. 2018. № 2. С. 104–123]. <https://doi.org/10.7868/S0002333718020096>.
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Konechnaya Y.V., Asming V.E., 2015. New Data about Seismicity and Crustal Velocity Structure of the "Continent-Ocean" Transition Zone of the Barents-Kara Region in the Arctic. *Journal of Seismology* 19, 219–230. <https://doi.org/10.1007/s10950-014-9462-z>.
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Konechnaya Ya.V., Asming V.E., Dulentsova L.G., Evtyugina Z.A., 2021. Seismicity in the Far Arctic Areas: Severnaya Zemlya and the Taimyr Peninsula. *Journal of Seismology* 25, 1171–1188. <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10032-1>.
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Konechnaya Ya.V., Zueva I.A., Asming V.E., Noskova N.N., Sharov N.V., Assinovskaya B.A., Panas N.M., Evtyugina Z.A., 2020b. Recent Seismicity in Northern European Russia. *Journal of Seismology* 24, 37–53. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09883-6>.
- Petrov O.V., Pubellier M. (Eds), 2019. *Tectonic Map of the Arctic*. Scale 1:10000000. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg (in Russian) [Тектоническая карта Арктики. Масштаб 1:10000000 / Ред. О.В. Петров, М. Пубелье. СПб.: ВСЕГЕИ, 2019].
- Spencer A.M., Embry A.F., Gautier D.L., Stupakova A.V., Sørensen K. (Eds), 2011. *Arctic Petroleum Geology*. Geological Society London Memoirs 35. 818 p. <https://doi.org/10.1144/M35>.
- Vaganova N.V., 2019. Some Features of the Deep Structure of the Arctic Territories According to Converted Waves. In: *Problems of Ensuring Environmental Safety and Sustainable Development of the Arctic Territories*. II Yudakhin Readings. Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation (June 24–28, 2019). OM-Media, Arkhangelsk, p. 64–68 (in Russian) [Ваганова Н.В. Некоторые особенности глубинного строения арктических территорий по данным обменных волн // II Юдахинские чтения: Проблемы обеспечения экологической безопасности и устойчивое развитие арктических территорий: Материалы Всероссийской конференции с международным участием (24–28 июня 2019). Архангельск: «ОМ-медиа», 2019. С. 64–68].
- Vaganova N.V., Morozov A.N., Shakhova E.V., 2018. Velocity Models of the Earth's Crust and Subcrustal Lithosphere of the Severnaya Zemlya Archipelago According to Converted Wave Data. In: E.A. Rogozhin, L.I. Nadezhka (Eds), *Results of a Comprehensive Study of the Strongest Altai (Chui) Earthquake of 2003, Its Place among the Most Important Seismic*

Events of the 21st Century in Russia. Proceedings of the XXI Scientific and Practical Shchukin Conference with International Participation (October 1–4, 2018, Moscow). IPE RAS Publishing House, Moscow, p. 81–86 (in Russian) [Ваганова Н.В., Морозов А.Н., Шахова Е.В. Скоростные модели земной коры и подкоровой литосферы архипелага Северная Земля по данным обменных волн // Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду

важнейших сейсмических событий XXI века на территории России: Материалы XXI Научно-практической Щукинской конференции с международным участием (1–4 октября 2018 г., Москва) / Ред. Е.А. Рогожин, Л.И. Надежка. М: Изд-во ИФЗ РАН. С. 81–86].

Vinnik L.P., 1977. Detection of Waves Converted from P to S in the Mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 15 (1), 39–45. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90008-5](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90008-5).