

На правах рукописи



Морозов Алексей Николаевич

**СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗАПАДНОГО СЕКТОРА
РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ
ЗА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ ПЕРИОД НАБЛЮДЕНИЙ**

Специальность 1.6.9. «Геофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральный исследовательский Центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук

Научный консультант: **Маловичко Алексей Александрович,**
член-корреспондент РАН, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», научный руководитель.

**Официальные
оппоненты:**

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук

Защита состоится «__» _____ 202__ г. в ____ на заседании Диссертационного совета 24.1.132.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций, созданного при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН) по адресу: 123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации www.vak.minobrnauki.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 202__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук

Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В течение всего инструментального периода обширные территории Арктики были крайне неравномерно и слабо охвачены стационарными сейсмическими наблюдениями из-за сложных климатических и географических условий, а также в силу исторических и экономических причин. Развитие инструментальных наблюдений в Арктике проходило неравномерно как во времени, так и в пространстве. Особенности развития инструментальных наблюдений напрямую влияли на сейсмологическую изученность арктических территорий.

Вплоть до конца XX века, функционировавшая в Арктике сеть сейсмических станций, как отметил Г.П. Аветисов [Аветисов, 1996], была достаточна лишь для проведения общего мониторинга сейсмического режима Арктического региона в целом и накоплению данных по уже известным его особенностям. Вместе с тем она была совершенно не удовлетворительна для осуществления детального изучения наиболее интересных и важных с позиций научного и прикладного аспектов узловых фрагментов сейсмоактивных зон. Значение представительной магнитуды, которая на раннем этапе инструментальных наблюдений, вплоть до 1957 г., оценивалась в 5.5–6.0, к концу 80-х г. для удалённых арктических территорий снизилась до 3.9–4.0 [Аветисов, 1996].

В результате, к концу XX века, как заметил в своей работе Г.Д. Панасенко [Панасенко, 1986], сложившиеся представления о сейсмичности Арктики оказались неполными и односторонне отражающими действительность, поскольку слабые землетрясения, изучение которых дает многое для выявления пространственно-временных вариаций сейсмичности и более правильного понимания связи ее с геологическим строением региона и развивающимися в его пределах геодинамическими процессами, не регистрировались. Аналогичные выводы сделали в своих работах и другие исследователи сейсмичности Арктики [Ассиновская, 1994; Аветисов, 1996; Юдахин, Французова, 2006; Schindwein et al., 2015].

В основе исследований по оценке сейсмической опасности любой территории лежит сейсмический каталог, по данным которого вычисляются параметры сейсмического режима. Для Арктического региона информация об исторических и палеоземлетрясениях практически недоступна, поэтому большую роль играют землетрясения, зарегистрированные за инструментальный период. Однако, вычисление основных параметров зарегистрированных землетрясений в Арктике в течение всего инструментального периода проходило в условиях малого количества станций и их удалённости от очага, с применением устаревших в настоящее время скоростных моделей и алгоритмов локации. Кроме того, бюллетени не всех функционировавших в регионе в течение XX века сейсмических станций были доступны сейсмологам при вычислении основных параметров арктических землетрясений. Землетрясения, зарегистрированные в течение всего инструментального периода, характеризуются магнитудными оценками разных типов, вычисленные в разных международных и региональных сейсмологических Центрах. Часть землетрясений в каталогах не имеют магнитудных оценок. Это

приводит к сложностям при сопоставлении данных о землетрясениях за разные периоды времени и для разных арктических территорий.

С конца XX и в начале XXI веков начался процесс интенсивного развития инструментальных наблюдений в Арктике. Количество зарубежных и отечественных сейсмических станций, оснащенных современной высокочувствительной аппаратурой, существенно увеличилось. Расширилась и географическая представительность стационарных сейсмических станций [Wilde-Piórko et al., 2009; Маловичко, 2010; Юдахин и др., 2012; Виноградов и др., 2012; Ottemöller et al., 2018; Schweitzer et al., 2021; Антоновская и др., 2022].

Однако, как и в XX веке, сейсмические станции принадлежат разным международным и региональным сейсмическим сетям. Вычисленные в разных сейсмологических Центрах параметры очагов арктических землетрясений отличаются, т.к. основаны, чаще всего, на анализе данных лишь станций конкретной сети, собственных региональных скоростных моделях и шкалах локальных магнитуд, а также вычислены с применением разных алгоритмов локации. Чаще всего региональные сейсмические сети, в силу географического расположения, «специализируются» на мониторинге отдельных арктических территорий. В результате низкомагнитудные землетрясения, зарегистрированные за пределами района ответственности, чаще всего одной или двумя станциями сети, не отражаются в каталогах регионального Центра. Кроме того, несмотря на возросшую плотность сейсмометрических наблюдений, условия для достоверной локации гипоцентров низкомагнитудных землетрясений до сих пор остаются неблагоприятными вследствие неравномерного распределения сейсмических станций и их удаленности друг от друга и от очагов.

Геолого-геофизические исследования в западном секторе Российской Арктики показали, что его нефтегазовый потенциал создал возможность для открытия таких крупных месторождений, как Штокмановское, Ледовое, Лудловское, Приразломное и др. на Баренцевом шельфе и Русановское, Ленинградское на Карском шельфе [Ivanova et al., 2006]. Поэтому, в настоящее время в рамках реализации проектов по освоению месторождений в Российской Арктике активно ведется проектирование и строительство промышленных систем и объектов. В соответствии с требованиями нормативных документов № 384-ФЗ [Технический регламент..., 2009], на разных стадиях реализации строительных проектов должны учитываться следующие оценки сейсмической опасности [Завьялов, Перетокин, 2022]:

- Нормативная сейсмичность – оценки сейсмической опасности на основе действующего комплекта карт общего сейсмического районирования (ОСР);
- Исходная сейсмичность – сейсмичность района строительства, которая принимается равной нормативной сейсмичности, либо конкретизируется в рамках исследований по детальному сейсмическому районированию (ДСР) или уточнению исходной сейсмичности (УИС);
- Расчетная сейсмичность – сейсмическая опасность площадки будущего строительства, определяемая на стадии сейсмического микрорайонирования (СМР) с учетом результатов ДСР или УИС и реальных грунтовых условий.

Учитывая географическое положение и климатические условия Арктики, зачастую проектируемые объекты располагаются на шельфе, или на суше, в условиях широко распространенной вечной мерзлоты. В связи с этим возникают следующие проблемы [Завьялов, Перетокин, 2022]:

- не вся территория западного сектора Российской Арктики обеспечена нормативными оценками сейсмической опасности;
- для проведения ДСР или УИС на территории арктической зоны РФ недостаточно сеймотектонических и сейсмологических данных.
- наиболее часто используемые в РФ методы СМР не предназначены для мерзлых пород или обводненных грунтов дна акваторий.

Таким образом, особенности развития инструментальных наблюдений, необходимость оценки потенциальных природно-техногенных рисков и обеспечения безопасной эксплуатации промышленных систем и объектов при освоении крупных месторождений в западном секторе Российской Арктики и инфраструктуры Северного морского пути накладывают необходимость в проведении исследований по обобщению и уточнению параметров очагов землетрясений, зарегистрированных за весь период инструментальных наблюдений. Такие исследования необходимо проводить с использованием новых и апробированных региональных скоростных моделей, уточненной шкалы локальной магнитуды, новых и современных алгоритмов локации и всех доступных в настоящее время исходных данных и бюллетеней функционировавших в регионе сейсмических станций.

Объектом исследования являются землетрясения, зарегистрированные за инструментальный период наблюдений в западном секторе Российской Арктики.

Цель работы – разработать совокупность технических решений, направленную на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений (гипоцентр, магнитуда) в западном секторе Российской Арктики и провести на её основе исследования по созданию уточнённых и унифицированных каталогов землетрясений за весь инструментальный период наблюдений, в том числе для территорий, ранее недоступных для детальных сейсмических наблюдений.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Для западного сектора Российской Арктики разработать совокупность технических решений, направленную на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений и учитывающую региональные тектонические условия региона.

2. Обобщить сведения о зарегистрированных за первые десятилетия XX века сильных арктических землетрясения и провести уточнение основных параметров их очагов.

3. Создать новый сводный уточнённый и унифицированный каталог землетрясений западного сектора Российской Арктики за инструментальный период.

4. Выявить пространственно-временные и энергетические особенности проявления современной слабой сейсмичности западного сектора Российской

Арктики и прилегающих территорий, ранее недоступных для детального сейсмического мониторинга.

5. Создать сводный уточненный каталог современных землетрясений приарктических территорий севера Восточно-Европейской платформы на основе объединения каталогов, бюллетеней и, частично, исходных данных всех региональных сейсмических сетей, функционирующих на севере платформы.

Исходные материалы и методы исследований.

Исходными материалами для исследований в рамках диссертации являлись бюллетени и данные отечественных и зарубежных сейсмических станций, функционировавших в Арктике с начала XX века по настоящее время, из следующих источников:

- архивы проектов «Historical Seismogram Filming Project», «USGS WWFC Pilot Scanning Project», EuroSeismos и ISC-GEM [Lee et al., 1988; Alejandro et al., 2019; Michelini et al., 2005; Storchak et al., 2015];

- архив ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»;

- архив Геофизического центра РАН;

- фонд Российской государственной библиотеки;

- архив ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН;

- личный архив д-ра Й. Швейцера (J. Schweitzer, University of Oslo) [Schweitzer, Lee, 2003];

- Сводные бюллетени: Shide Circulars (1899–1912); ISA bulletins (1895–1897, 1903–1908); Бюллетени ПЦСК (1902–1907, 1911–1912); BAAS (1913–1918); International Seismological Summary (1918–1963); Бюллетень сети сейсмических станций СССР/Сейсмологический бюллетень сети опорных сейсмических станций СССР (1954–1970); Bulletin of the International Seismological Centre (1964 – по настоящее время); NEIC bulletin (1973 – по настоящее время).

- электронные ресурсы FDSN [FDSN, 2022], GEOFON [GEOFON, 2022], ORFEUS [ORFEUS, 2022] и IRIS [IRIS, 2022]

В работе использован набор методов математической геофизики, сейсмологии, ГИС-технологии и др.

Научная новизна и практическая значимость работы состоит в следующем:

– создан сводный электронный архив, содержащий бюллетени сейсмических станций, функционировавших в первой половине XX века, сведения об их аппаратуре, а также сводные бюллетени и каталоги землетрясений начала XX века. Это позволяет проводить исследования по уточнению основных параметров очагов ранее зарегистрированных землетрясений на основе наиболее полных наборов инструментальных данных.

– Создан метод вероятностной локации раннеинструментальных землетрясений на основе совместного анализа их макросейсмических и инструментальных данных. Для территорий, которые с одной стороны характеризуются умеренной сейсмичностью, но с другой – не обладали долгое время плотной сетью сейсмических станций из-за малонаселённости, труднодоступности и невысокого уровня их экономического развития, данный метод позволяет проводить локацию землетрясений при небольшом количестве

макросейсмических сведений и данных лишь одной или двух сейсмических станций.

– Вычислены и апробированы новые региональные скоростные модели, создана комбинированная модель, состоящая из 11 региональных моделей, уточнена шкала магнитуды M_L , что позволяет повысить достоверность локации и магнитудных оценок землетрясений в западном секторе Российской Арктики и на прилегающих территориях.

– Выявлены соотношения между магнитудами разных типов, вычисленные в отечественных и зарубежных региональных сейсмологических Центрах, что позволяет унифицировать магнитуды при создании сводных каталогов для оценки сейсмической опасности арктических территорий.

– Выявлены «забытые» сильные землетрясения Арктики, зарегистрированные в первые десятилетия XX века и не упоминающиеся в современных каталогах, что может оказать влияние на итоговую оценку сейсмической опасности некоторых арктических территорий.

– Создан наиболее полный уточнённый каталог землетрясений Арктики за период с 1904 по 1920 гг. с параметрами очагов для большей части рассмотренных землетрясений существенно отличными от первоначальных, указанных в различных источниках.

– Создан новый уточнённый и унифицированный каталог землетрясений для западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 гг., который позволил уточнить пространственное распределение землетрясений в регионе и предложить рекомендации по корректировке границ, значений максимально возможных магнитуд и глубин сейсмогенных слоёв доменов линеаментно-доменно-фокальных (ЛДФ) моделей карт общего сейсмического районирования ОСР-97 и -2016 для данного региона.

– Выявлены зоны повышенной сейсмичности в Баренцево-Карском регионе в районах, ранее недоступных для детального сейсмического мониторинга и, соответственно, не представленные в ЛДФ-моделях карт ОСР-97 и ОСР-2016.

– Впервые по данным многолетних стационарных сейсмических наблюдений выявлены пространственно-временные особенности проявления слабой сейсмичности и роевых последовательностей срединно-океанического хребта Гаккеля, одной из главных сейсмоактивных зон в Арктике. Полученные результаты позволили уточнить наши представления о проявлении вулcano-тектонических процессов, протекающих в пределах хребта.

– Создан единый уточнённый каталог современных землетрясений приарктических территорий севера Восточно-Европейской платформы с использованием апробированной региональной модели, современного алгоритма локации и на основе бюллетеней, частично, исходных данных всех региональных сейсмических сетей, функционирующих на севере платформы.

– Уточнение параметров очагов землетрясений, зарегистрированных за инструментальный период на севере Русской плиты, позволило исключить землетрясения, не относящиеся к данному региону и, наоборот, включить ранее не фигурировавшие в сейсмических каталогах по Европейскому Северу.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется получением новых знаний, имеющих отношение к фундаментальным областям сейсмологии и возможностью их применения при оценке сейсмической опасности арктических территорий и для обеспечения безопасной эксплуатации промышленных систем и объектов при освоении крупных месторождений в западном секторе Российской Арктики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Совокупность технических решений, направленная на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений западного сектора Российской Арктики, включающая в себя: новые и апробированные региональные одномерные скоростные модели; комбинированную модель, состоящую из 11 региональных моделей; уточненную шкалу локальной магнитуды *ML* и корреляционные связи между магнитудами разных типов, вычисленными в различных сейсмологических центрах; новый метод вероятностной локации раннеинструментальных землетрясений; применение современного алгоритма локации; созданный сводный электронный архив бюллетеней сейсмических станций первой половины XX века и интеграция цифровых данных отечественных и зарубежных сейсмических станций, функционирующих в XXI веке.

2. Уточнённый и унифицированный каталог раннеинструментальных землетрясений Арктики за период с 1904 по 1920 гг., включающий «забытые» сильные землетрясения, не упоминающиеся в современных каталогах, и содержащий параметры гипоцентров для большей части землетрясений, существенно отличные от первоначальных, приведенных в различных источниках.

3. Новый уточнённый и унифицированный каталог землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 гг., отражающий зоны повышенной сейсмичности в районе желобов Франц-Виктория и Св. Анны, о. Белый, архипелагов Новая Земля и Северная Земля и позволивший сформулировать рекомендации по изменению границ, значений максимально возможных магнитуд и глубин сейсмогенных слоёв доменов ЛДФ-моделей карт ОСР-97 и ОСР-2016 для данного региона.

4. Пространственно-временные закономерности проявления современной слабой сейсмичности и роевых последовательностей хребта Гаккеля, выявленные на основе данных многолетних стационарных сейсмических наблюдений, характеризуют особенности проявления вулcano-тектонических процессов в пределах арктического ультрамедленного хребта, относящегося к слабоизученному типу срединно-океанических хребтов.

Достоверность полученных результатов и их апробация. Достоверность полученных результатов обеспечена статистически представительным фактическим сейсмологическим материалом, унифицированным подходом к интерпретации полученных данных и комплексированием методов исследований. О достоверности также свидетельствуют системный характер и непротиворечивость конечных результатов, а также согласованность с данными многих исследователей. Значительная часть материалов, изложенных в диссертационной работе, опубликована в рецензируемых рейтинговых журналах, а также получила экспертную оценку ученых и специалистов как составная часть

отчетов о результатах фундаментальных исследований или заключений по результатам обследования различных объектов.

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на различных периодических международных и всероссийских конференциях: General Assembly of the European Seismological Commission (ESC) (Италия, Турин, 2016 г.); Международных сейсмологических школах «Современные методы обработки интерпретации сейсмологических данных» (2009, 2010, 2011, 2022 гг.); Юдахинские чтения «Геодинамика и экология Баренц-региона в XXI веке» (Архангельск, 2012, 2014 гг.); Научные чтения памяти Ю.П. Булашевича «Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей» (Екатеринбург, 2013, 2021 гг.) и др. Всего было сделано более 30 устных докладов.

Личный вклад автора. Формулировка цели и выбор методов диссертационного исследования, разработка и интерпретация результатов исследования. Диссертанту принадлежит определяющая роль в получении всех результатов диссертационной работы. Им лично написана существенная часть объема публикаций по теме диссертации.

По тематике диссертационной работы диссертант являлся руководителем грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (№№ МК-930.2014.5, МК-7387.2016.5), проекта РФФИ (№ 16-35-00020), молодёжных грантов УрО РАН (№№ 11-5-НП-339, 13-5-НП-272). Ответственным исполнителем и исполнителем тем государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН (№№ АААА-А16-116052710111-2, АААА-А18-118012490072-7), ИФЗ РАН (№№ АААА-А19-119072590031-6, 122040600090-0) проектов РФФИ (№№ 14-05-98801, 10-05-00497-а), в т. ч. международного (№ 14-05-93080); программы Президиума РАН (№ 12-П-5-1009); ФЦП (Госконтракт №№ 14.740.11.0195, 8331) и гранта РФФИ (№ 22-27-00190).

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 28 статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК РФ и индексируемых в Web of Science, Scopus и RSCI; в одной монографии и в пяти главах коллективных отечественных и зарубежных монографиях. Создано одно учебно-методическое пособие и получено три свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и базы данных.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 378 наименований и трёх приложений. Работа изложена на 293 страницах машинописного текста и содержит 69 рисунков и 35 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному консультанту члену-корреспонденту РАН Алексею Александровичу Маловичко за всестороннюю поддержку, плодотворные дискуссии и консультации. Искреннюю признательность за поддержку и советы автор выражает д.ф.-м.н. А.Д. Завьялову (ИФЗ РАН), к.ф.-м.н. И.М. Алёшину (ИФЗ РАН) и к.ф.-м.н. И.П. Габсатаровой (ФИЦ ЕГС РАН). Особую благодарность автор выражает д.ф.-м.н. А.А. Никонову (ИФЗ РАН) за творческое общение и рекомендации, которые побудили автора

заняться проблемой уточнения параметров очагов землетрясений за инструментальный период наблюдений, и к.ф.-м.н. В.Э. Асмингу (ФИЦ ЕГС РАН), чьи современные сейсмологические программные продукты и творческое общение помогли успешно решить задачу уточнения параметров очагов землетрясений.

Автор благодарен к.ф.-м.н. В.И. Францужовой, в лице которой он нашёл своего первого наставника в науке. Автор выражает благодарность д.т.н. Г.Н. Антоновской (ФИЦКИА УрО РАН), усилиями которой в Российской Арктике были введены в строй и функционируют новые сейсмические станции Архангельской сети. Особую благодарность за ценные идеи, дискуссии и совместную работу автор выражает своему постоянному соавтору, единомышленнику и помощнику во всех научных начинаниях к.г.-м.н. Н.В. Вагановой (ФИЦКИА УрО РАН). Автор благодарит сотрудников лаборатории сейсмологии ФИЦКИА УрО РАН, своих многолетних уважаемых коллег к.т.н. Я.В. Конечную, к.ф.-м.н. Е.В. Шахову, к.ф.-м.н. К.Б. Данилова, Я.А. Михайлову, А.И. Кошкина, Е.В. Иванову за взаимопомощь на различных этапах исследований.

Автор хранит светлую память о член-корреспонденте РАН, профессоре Феликсе Николаевиче Юдахине, который занимался становлением и развитием сейсмологии в Архангельской области, общение с которым сформировало взгляды автора на большинство рассмотренных в работе вопросов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы, определяются цель и задачи исследования, описываются научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приводятся структура работы и методология исследования, аргументируется достоверность результатов, формулируются основные научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. История сейсмологических исследований Арктики

В главе приведён анализ развития инструментальных наблюдений и истории изучения сейсмичности Арктики. Особенности развития инструментальных наблюдений напрямую влияли на сейсмологическую изученность арктических территорий. В Главе уделяется внимание на технические ограничения, с которыми сталкивались исследователи при изучении сейсмичности арктических территорий в течение всего инструментального периода.

Первое землетрясение в Арктике было инструментально зарегистрировано сейсмическими станциями мировой сети 9 октября 1904 г. [Tams, 1922], а первая стационарная станция севернее Полярного Круга начала функционировать в 1906 г. в п. Васияуре (Vassijaure) на севере Швеции [Kulhánek, 1988]. Однако из-за сложных климатических и географических условий, а также в силу исторических и экономических причин развитие инструментальных наблюдений в течение всего XX века проходило медленно и неравномерно как во времени, так и в пространстве.

Вплоть до 1950-х г. развитие стационарных сейсмических наблюдений севернее Полярного круга практически не происходило. В основном развитие инструментальных наблюдений в мире происходило в сейсмоактивных регионах:

увеличивалось число сейсмических станций и повышалась чувствительность их оборудования. Вследствие своей удаленности станции мировой сети регистрировали только достаточно сильные землетрясения в Арктике, хотя постепенно магнитудный порог снижался за счет повышения чувствительности аппаратуры сейсмических станций и их количества.

Поэтому первые представления о сейсмичности Арктики были получены по данным станций мировой сети и временным станциям при экспедиционных исследованиях. Одно из первых обобщений сведений о сейсмичности Арктического региона в этот период приведено в работах [Tams, 1922, 1927]. Отмечалось о наличии зоны сейсмической активности, которая протягивается между Гренландией и Скандинавией через острова Исландию, Ян-Майен и архипелаг Шпицберген. В работе [Gutenberg, Richter, 1941] приведен каталог землетрясений для Арктики за период с 1921 по 1938 гг. с указанием точности определения координат. При этом в каталоге приведено меньше землетрясений, чем в более ранних работах [Райко, Линден, 1935] и [Некк, 1938], как указано, по причине их недостаточной обоснованности. Но даже такое количество землетрясений было достаточно, чтобы показать распространение сейсмоактивного пояса в Арктике.

С 1950 по 1960 гг. количество сейсмических станций севернее Полярного круга увеличилось (Рис. 1). Прежде всего, этому способствовала подготовка и проведение Международного геофизического года (МГГ) (1957–1958 гг.) [Odishaw, 1959; Stoneley, 1960]. По результатам исследований в рамках МГГ вышло много работ, посвященных сейсмичности Арктики, например, работы Н.А. Линден [Линден, 1959, 1963], А.П. Лазаревой [Лазарева, 1963] и Е.А. Hodgson [Hodgson, 1965]. В работе [Hodgson et al., 1965] приведены обобщение знаний о сейсмичности Арктики до МГГ и предварительные итоги его проведения. В работе описываются уже известные на тот момент сведения о сейсмоактивных зонах в Арктике и указывается, что эпицентры, зарегистрированные в период МГГ, подтверждают данные сведения. Любопытным для нас является указание в статье на наличие для каждой арктической станции локальной (региональной) сейсмичности, которая из-за малого количества сейсмических станций в Арктике и их удалённости, не регистрируется другими станциями. Поэтому выделить в пространстве зоны сейсмической активности не представлялось возможным. Такая проблема, когда низкомагнитудные землетрясения регистрируются только одной станцией, будет актуальной и до настоящего времени.

В 1960-х г. начинается развёртываться Всемирная сеть сейсмографических станций (World-Wide Network of Seismograph Stations, WWSSN), которая насчитывала к 1971 г. примерно 120 станций с однотипной аппаратурой, часть из них функционировали севернее Полярного Круга. В 1964 г. Сессия Совета по сейсмологии приняла структуру Единой системы сейсмических наблюдений в СССР (ЕССН). Было принято, что ЕССН состоит из опорных и региональных станций, объединённых в соответствующие сети. Осенью 1964 г. на сессиях Совета по сейсмологии было принято Положение о зональных сетях сейсмических станций, независимых от республиканских границ, объединённых едиными

объектами наблюдений и исследований – сейсмоактивными зонами. Одной из сейсмоактивных зон была Арктическая [Старовойт, 2005].

N, шт.

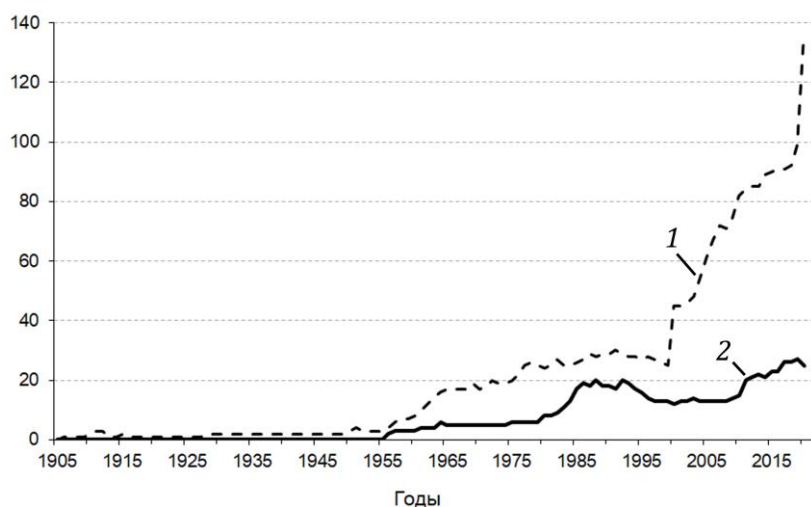


Рис. 1. Динамика изменения по годам количества стационарных сейсмических станций, функционировавших севернее Полярного Круга: 1 – зарубежные станции; 2 – отечественные станции

Таким образом, к началу 70-х благодаря расширению сети арктических станций представительный уровень регистрации в целом для

Арктики составил 4.0-4.5 [Аветисов, 1996]. Ошибка в определении эпицентров, согласно [Wetmiller, Forsyth, 1978], была около 50 км для большинства землетрясений и около 20 км для сильных землетрясений. В [Новый каталог..., 1977] для землетрясений с 1963 по 1974 гг. характерен класс точности не ниже 4 (погрешность $\pm 0.2^\circ$).

В этот период опубликована работа [Sykes, 1965], в которой автор переуточнил с использованием компьютера параметры землетрясений за период с января 1955 г. по март 1964 г. Точность определения эпицентров составила 10 км. В предыдущих исследованиях точность определения координат эпицентров была значительно меньше. Такая точность позволила подробно описать особенности распространения основного сейсмического пояса Арктики, отметив отдельно, что он довольно узкий и линейный, и привязать его к возможному срединно-арктическому хребту. До этого уже в работе [Heezen, Ewing, 1961] постулировалось, что пояс землетрясений в Арктике может быть приурочен к срединно-океаническому хребту, который простирается в Евразийском суббасейне.

В течение 1970-х г. расширение сети арктических станций происходило практически только на Североамериканском континенте, главным образом на Аляске. Напротив, в 80-е г., количество арктических сейсмических станций заметно увеличилось (Рис. 1). После разрушительных землетрясений в Газли в апреле и мае 1976 г. направление дальнейших исследований в области сейсмологии и сейсмостойкого строительства в Советском Союзе определило Постановление Совета Министров СССР в 1977 г. В частности, в 1978 г. в целях усиления научных исследований в области сейсмологии в Академии наук СССР в системе сейсмических наблюдений в стране стал перевод станций на новую систему финансирования. Это крайне положительно сказалось на развитии региональных сетей сейсмических станций. В течение 80-х годов в СССР была открыта 201 новая станция [Старовойт, 2005]. Огромная работа по расширению сети арктических региональных станций в этот период была проведена сотрудниками Кольского

научного центра АН СССР и Опытной-методической сейсмологической партии Якутского филиала Сибирского отделения Академии наук СССР.

С 1986 г. начинает функционировать Глобальная сейсмическая сеть (Global Seismic Network, GSN) IRIS-USGS, созданная в партнерстве между Геологической службой США, Национальным научным фондом (NSF) и Объединенными исследовательскими институтами сейсмологии (IRIS) [Hutt et al., 2002]. Сеть GSN обеспечивает практически однородный всемирный мониторинг Земли с помощью более 150 современных сейсмических станций, расположенных по всему миру. В последствии в 1990-х годах под эгидой этой сети будут открываться новые сейсмические станции в Арктическом регионе.

Сеть арктических сейсмических станций к концу 80-х годов обеспечивала регистрацию без пропусков землетрясений с $M=3.9-4.0$. В то же время в Арктической Канаде и Северной Аляске регистрировались землетрясения с $M=3.0-3.5$. Для Фенноскандии это значение доходило до $M=2.0-2.5$ [Аветисов, 1996].

Функционирующая в Арктике в течение XX века сеть отечественных и зарубежных сейсмических станций не позволяла осуществлять детальное изучение наиболее интересных и важных с позиций научного и прикладного аспектов узловых фрагментов сейсмоактивных зон [Аветисов, 1996]. Результаты немногочисленных экспедиционных исследований в Арктическом регионе, которые подразумевали установку временных сейсмических станций, подтверждали неполноту наших знаний об особенностях проявления слабой сейсмичности в Арктике [Kristoffersen et al., 1982; Аветисов, 1996; Schlindwein et al., 2005, 2013; Hope, 2013; Гайцслер, 2018; Крылов и др., 2020].

Вычисление параметров очагов землетрясений, зарегистрированных в течение всего XX века, проходило в условиях малого количества станций и их удаленности от очага, с применением устаревших в настоящее время скоростных моделей и алгоритмов локации. При этом бюллетени не всех функционировавших в течение XX века арктических сейсмических станций были доступны сейсмологам, т.к. они принадлежали сетям разных стран и организаций. Арктические землетрясения, зарегистрированные в течение всего инструментального периода, характеризуются магнитудными оценками разных типов, вычисленные в разных международных и региональных сейсмологических Центрах. Часть землетрясений в каталогах не имеют магнитудных оценок. Это приводит к сложностям при сопоставлении данных о землетрясениях за разные периоды времени и для разных арктических территорий.

После распада СССР в 1991 г. и последовавшего за ним экономического кризиса количество сейсмических станций в России заметно сократилось. В период с 1991 по 1994 гг. в России прекратили свою работу около 60 станций [Маловичко и др., 2007], в том числе большое количество арктических станций. При этом, закрытие одних станций компенсировалось открытием новых станций и модернизацией действующих [Виноградов и др., 2012].

С конца XX и в начале XXI в. начался процесс интенсивного развития инструментальных наблюдений в Арктике. Количество зарубежных и отечественных сейсмических станций, оснащенных современной высокоточной аппаратурой, существенно увеличилось (Рис. 1).

Расширилась и географическая представительность стационарных сейсмических станций [Юдахин и др., 2012; Morozov et al., 2013; Конечная, 2015; Антоновская и др., 2018; Маловичко, 2010; Маловичко и др., 2017; Виноградов и др., 2012; Wilde-Piórko et al., 2009; Ottemöller et al., 2018; Antonovskaya et al., 2020; Schweitzer et al., 2021]. В результате появились благоприятные условия для регистрации низкомагнитудных землетрясений и анализа пространственно-временных особенностей проявления слабой сейсмичности в разных районах Арктики и, прежде всего, в западном секторе Российской Арктики и прилегающих территориях [Morozov et al., 2014, 2015; Конечная, 2015; Рогожин и др., 2016; Rogozhin et al., 2018; Antonovskaya et al., 2020].

Однако, как и в XX веке, сейсмические станции принадлежат различным международным и региональным сейсмическим сетям. Вычисленные параметры очагов арктических землетрясений отличаются в разных сейсмологических Центрах, т.к. основаны, чаще всего, на анализе данных лишь станций конкретной сети, собственных региональных моделей и шкал локальных магнитуд, а также вычислены с применением разных алгоритмов локаций. Чаще всего региональные сейсмические сети, в силу географического расположения, «специализируются» на мониторинге отдельных арктических территорий. В результате низкомагнитудные землетрясения, зарегистрированные за пределами района ответственности, чаще всего одной или двумя станциями сети, не отражаются в каталогах регионального Центра. Кроме того, несмотря на возросшую плотность сейсмометрических наблюдений, условия для достоверной локации гипоцентров низкомагнитудных землетрясений до сих пор остаются неблагоприятными по причине неравномерного распределения сейсмических станций и их удаленности друг от друга.

Выводы главы 1

В течение всего инструментального периода обширные территории Арктики были крайне неравномерно и слабо охвачены стационарными сейсмическими наблюдениями из-за сложных климатических и географических условий, а также в силу исторических и экономических причин. Развитие инструментальных наблюдений в Арктике проходило неравномерно как во времени, так и в пространстве.

Вычисление параметров очагов землетрясений в Арктике в течение всего инструментального периода проходило в условиях малого количества станций и их удалённости от очага, с неполным набором инструментальных данных, с применением устаревших в настоящее время скоростных моделей и некоторых алгоритмов локации, и магнитудными оценками разных типов, вычисленными в разных сейсмологических центрах.

Глава 2. Анализ сейсмологической информации Арктики

В главе приведены результаты разработки совокупности технических решений, направленной на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений западного сектора Российской Арктики, включающая в себя: новые и апробированные региональные одномерные скоростные модели; комбинированную модель, состоящую из 11 региональных моделей; уточненную

шкалу локальной магнитуды ML и корреляционные связи между магнитудами разных типов, вычисленными в различных сейсмологических центрах; новый метод вероятностной локации раннеинструментальных землетрясений; применение современного алгоритма локации; созданный сводный электронный архив бюллетеней сейсмических станций первой половины XX века и интеграция цифровых данных отечественных и зарубежных сейсмических станций, функционирующих в XXI веке.

В сейсмологии распространены исследования по уточнению параметров очагов ранее произошедших землетрясений. Как правило, уточнение, с целью повышения достоверности результатов, происходит спустя некоторое время, когда появляется возможность привлечь дополнительные инструментальные данные, появляются уточненные скоростные модели, новые методические подходы и алгоритмы расчёта параметров землетрясений.

Бюллетени не всех функционировавших в течение XX века сейсмических станций были доступны сейсмологам для оценки основных параметров арктических землетрясений. Поэтому, были проведены изыскания бюллетеней сейсмических станций, функционировавших, прежде всего, в первой половине XX века, в архивах, созданных при реализации крупных специализированных научных проектов: «Historical Seismogram Filming Project» [Lee et al., 1988], поддержанного ЮНЕСКО, «USGS WWFC Pilot Scanning Project» [Alejandro et al., 2019], «EuroSeismos» [Michelini et al., 2005], ISC-GEM (International Seismological Centre-Global Earthquake Model) [Storchak et al., 2015], а также в фондах ФИЦ ЕГС РАН, Российской государственной библиотеки, Геофизического Центра РАН, в различных научных статьях и монографиях. Также Й. Швейцером (Johannes Schweitzer) из Университета Осло был передан автору архив, состоящий из бюллетеней сейсмических станций и сводных каталогов землетрясений первой половины XX века [Schweitzer, Lee, 2003].

Результатом подобных изысканий стало создание сводного электронного архива, состоящего из бюллетеней сейсмических станций, функционировавших в первой половине XX века, и технических сведений об их аппаратуре, а также сводные каталоги и бюллетени землетрясений XX века. Это позволило проводить исследования по уточнению параметров ранее зарегистрированных землетрясений на основе наиболее полных наборов инструментальных данных.

В конце XX и начале XXI века произошло существенное увеличение количества сейсмических станций в Арктике. Как следствие, для некоторых районов Арктики при регистрации землетрясений уменьшилось значение минимальной и представительной магнитуд. Однако, даже при том факте, что количество стационарных сейсмических станций в Арктике в настоящее время является наибольшим за весь инструментальный период наблюдений, условия для достоверной локации гипоцентров землетрясений, особенно низкомagnitudeных, остаются все ещё неблагоприятными по причине неравномерного распределения сейсмических станций и их удалённости друг от друга. Поэтому, при вычислении основных параметров низкомagnitudeных землетрясений необходимо использовать исходные цифровые данные максимально возможного количества станций международных и национальных сетей, функционирующих в настоящее время в

регионе [Конечная, 2015]. Такие данные можно получить через официальные сайты FDSN [FDSN, 2022], GEOFON [GEOFON, 2022], ORFEUS [ORFEUS, 2022], IRIS [IRIS, 2022], а также в ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН и ФИЦ ЕГС РАН. Данные о временах вступлений сейсмических фаз можно получить также в бюллетенях ISC (International Seismological Centre) [International ..., 2020] и ФИЦ ЕГС РАН [Единая геофизическая..., 2020] и в сводном бюллетене для Европейской Арктики за период с 1990 по 2013 гг. [Schweitzer et al., 2021]. Это создало условия для вычисления параметров очагов современных землетрясений с привлечением максимально возможного числа функционирующих сейсмических станций, расположенных в широком азимутальном створе и диапазоне эпицентральных расстояний.

В течение XX века постепенно расширялись знания о распространении волн в Земле. Постепенно совершенствовались скоростные модели, применяемые при локации землетрясений, начиная от модели Р. Олдхэма [Oldham, 1900] до используемой в настоящее время *ak135* [Kennett et al., 1995; Kennett, 2005]. В течение XX века параметры гипоцентров землетрясений вычислялись при использовании разных скоростных моделей, устаревших в настоящее время. Поэтому, при уточнении параметров очагов землетрясений по данным удалённых сейсмических станций использовалась актуальная в настоящее время глобальная скоростная модель *ak135*.

При значительном увеличении количества сейсмических станций в Арктике и появлении возможности регистрировать низкомагнитудные землетрясения остро встал вопрос о создании региональных моделей, т.к. глобальные модели не учитывают региональные особенности распространения сейсмических волн. Для западного сектора Российской Арктики и прилегающих территорий были созданы модели: NOES [Морозов, Ваганова, 2017] для севера Баренцево-Карского региона и зоны перехода «континент-океан»; NOES_hybrid для Евразийского суббассейна; NORP [Морозов, Ваганова, 2011] для севера Русской плиты. Для шельфовых территорий Баренцево-Карского региона применялась региональная модель BARENTS [Kremenetskaya et al., 2001]. Была создана комбинированная скоростная модель для Евразийской Арктики, представляющая собой совокупность одномерных скоростных моделей, каждая из которых работает в заданной географической области (регионализация по И. Бондарю, [Bondaâr, North, 1999]).

Тестирование новых и ранее созданных региональных моделей осуществлялось в том числе с использованием подземных ядерных взрывов, произведенных на архипелаге Новая Земля и на севере Европейской части России [Михайлов и др., 1997; Adushkin, Leith, 2001; Халтурин и др., 2005]. Местоположение эпицентра, глубина и время в очаге этих взрывов известны с большой точностью. Поэтому процедура пересчета гипоцентра по фактическим временам вступления может показать эффективность (либо некорректность) применения конкретных моделей. В частности, тестовыми событиями выступали четыре подземных ядерных взрыва. Это взрывы, произведенные 02.11.1974 г. и 24.10.1990 г. на ядерном полигоне на архипелаге Новая Земля и 18.07.1985 г. и 06.09.1988 г. на севере Европейской части России (Рис. 2). Ядерный взрыв 1974 г. является событием «ground-truth» категории GT5 по [Yang et al., 2000], т.е.

параметры эпицентра известны с точностью 5 км, а взрывы 1985, 1988 и 1990 гг. являются событиями категории GT1 – параметры известны с точностью 1 км.

Существуют территории, которые с одной стороны характеризуются умеренной сейсмичностью, но с другой – не обладали долгое время плотной сетью сейсмических станций из-за малонаселённости, труднодоступности и невысокого уровня их экономического развития. Для таких территорий характерны землетрясения, по которым имеются небольшое количество макросейсмических сведений и данные лишь по одной или двум сейсмическим станциям. Чаще всего при локации таких землетрясений использовались только макросейсмические сведения. Поэтому был создан метод вероятностной локации таких землетрясений, использующий совместно макросейсмические сведения и инструментальные данные [Морозов и др., 2023], и основанный на применении наивного Байесовского классификатора. Метод реализован в программе ProLom (Probabilistic Locator by Macroseismics) [Асминг, Морозов, 2023].

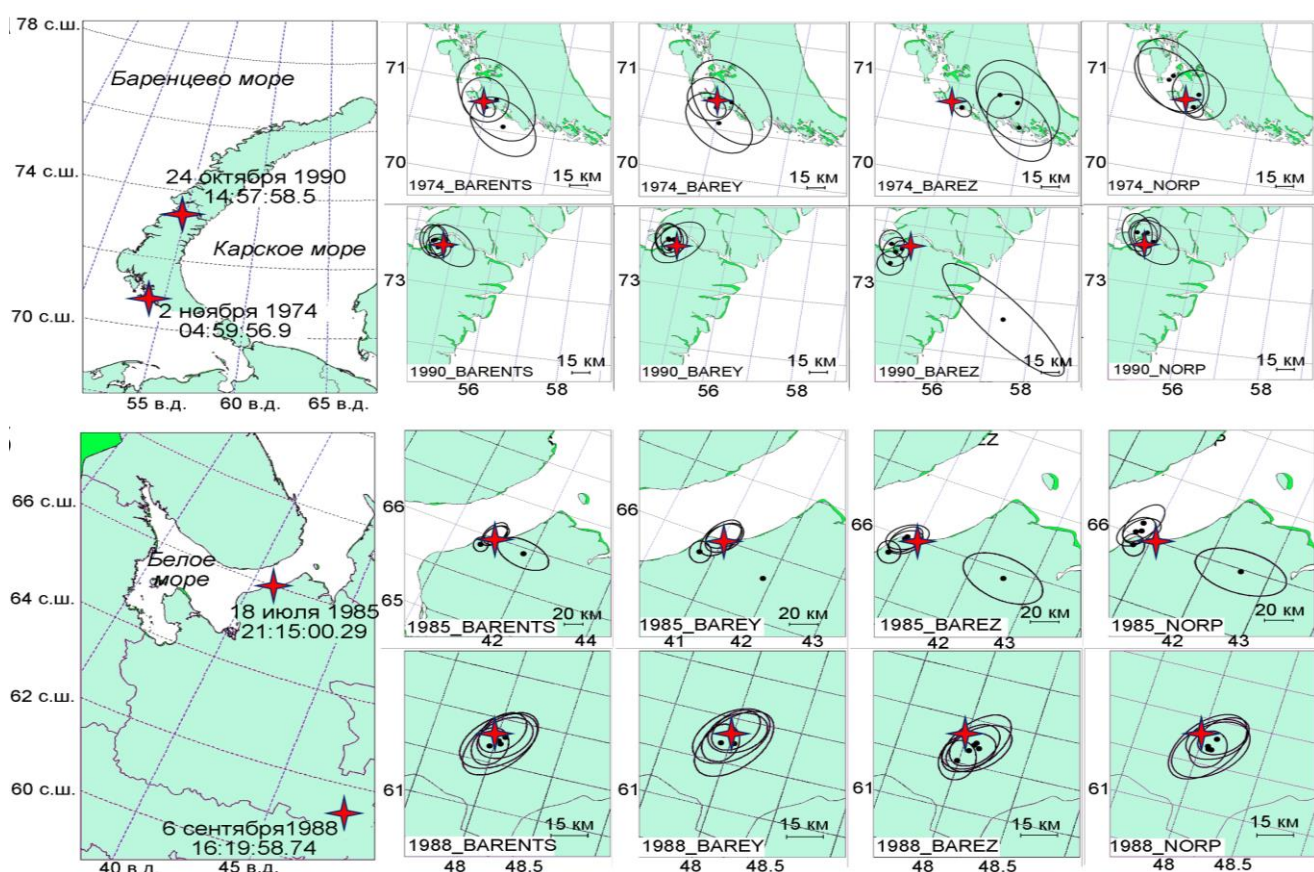


Рис. 2. Тестирование региональных скоростных моделей с использованием подземных ядерных взрывов [Михайлов и др., 1997; Adushkin, Leith, 2001; Халтурин и др., 2005] и с применением алгоритма расчёта программы NAS [Асминг и др., 2021].

На картах изображены вычисленные эпицентры с эллипсами ошибок (кружки) для наборов данных по временам вступлений станций в пределах эпицентральных расстояний 0–10°, 0–15°, 0–20°, 0–30° и 0–90° и эпицентры (звездочки) подземных ядерных взрывов по [Sultanov et al., 1999; Yang et al., 2003]

Для уточнения параметров гипоцентров использовался новый алгоритм локации программы NAS (New Association System) [Асминг, Прокудина, 2016;

Асминг и др., 2021], основанный на комбинации двух методов – максимизации рейтинговой функции на сетке, являющегося совершенствованием метода Generalized beamforming [Ringdal, Kvaerna, 1989], и минимизации невязки оценки времени в очаге. Алгоритм программы NAS имеет ряд преимуществ, которые являются полезными для процесса уточнения параметров очагов землетрясений на основе бюллетеней сейсмических станций первой половины XX века. Во-первых, алгоритм программы игнорирует ошибочные времена вступлений сейсмических фаз, которые возникли из-за действий оператора или неисправности аппаратуры. Во-вторых, в бюллетенях нередко случаи, когда указаны только времена вступлений без идентификации фаз. В таких случаях алгоритм сам проводит идентификацию фаз по временам вступлений.

Для оценки значений сейсмической активности и её картировании создана программа Seisactivity [Алешин, Морозов, 2022]. Понятие сейсмической активности как количественном выражении сейсмичности введено Ю.В. Ризниченко и И.Л. Нерсесовым [Ризниченко, 1958]. Согласно этому понятию за меру выражения сейсмичности принимается число землетрясений определенного энергетического класса (магнитуды), происходящих в единицу времени и в единицу пространства при условии постоянства некоторого среднего сейсмического режима. Такое определение удобно тем, что сейсмическая активность совместно с графиками повторяемости землетрясений позволяет объективно сопоставить друг с другом различные сейсмоактивные области.

Магнитуда землетрясений является одним из фундаментальных параметров, используемых в каталогах землетрясений. Понятие магнитуды было введено после нескольких десятилетий с момента создания первых сейсмометров. Впервые понятие магнитуда была введена Ч.Ф. Рихтером [Richter, 1935]. В настоящее время эта магнитуда обозначается индексом ML и рассчитывается по данным близких от очага сейсмических станций. Позже Б. Гутенбергом [Gutenberg, 1945] были введены шкалы магнитуд mB и MS , которые вычислялись по данным сейсмических станций на телесеизмических расстояниях. Это позволило рассчитывать магнитуды для землетрясений, произошедших в удаленных районах, а также районах, где отсутствуют сейсмические станции. Впоследствии способы расчёта магнитуд, введенных Б. Гутенбергом, были изменены. В настоящее время MS оценивается с использованием значений амплитуд и соответствующих им периодов в диапазоне от 10 до 60 с и на эпицентральных расстояниях от 20° до 160° с применением формулы [Ванек и др., 1962]:

$$MS = \log(A/T)_{max} + 1.66 \log(\Delta) + 3.3 \quad (1)$$

Для оценки локальной магнитуды землетрясений, зарегистрированных в западном секторе Российской Арктики и прилегающих территориях, использовалась уточненная для данного региона калибровочная кривая магнитуды ML [Морозов и др., 2020]:

$$ML = \lg A - \lg A_0(R) + S, \quad (2)$$

$$\text{где } -\lg A_0(R) = 1.5 \cdot \lg(R/100) + 1.0 \cdot 10^{-4}(R-100) + 3.0. \quad (3)$$

Как уже отмечалось, арктические землетрясения характеризуются магнитудными оценками разных типов и вычисленных в разных международных и региональных сейсмологических центрах. Поэтому были проведены исследования

по выявлению корреляционных соотношений между магнитудами разных типов, вычисленными в международных и региональных сейсмологических центрах. На основе данных ISC за период с 1995 по 2020 гг. было получено 40 соотношений между магнитудами разных типов, вычисленными в различных центрах, которые условно можно разделить на три группы: магнитуды *mb* и *MS*, вычисленные в международных сейсмологических центрах; магнитуды *mb*, *MS* и *ML*, вычисленные в международных и региональных центрах; и магнитуды *ML* – только в региональных центрах. Не все построенные соотношения являются в равной степени статистически значимыми. Наименьшие коэффициенты корреляции и детерминации имеют соотношения, связывающие магнитуды *mb* и *MS*, вычисленные в международных центрах, с локальными магнитудами *ML*, вычисленными в региональных центрах.

Полученные корреляционные соотношения между магнитудами разных типов, частично опубликованные в [Морозов и др., 2022], в совокупности с результатами подобных исследований [Аветисов, 1996; Di Giacomo et al., 2015; Petrova, Gabsatarova, 2020; Петрова, Курова, 2023], в целом позволяют создавать сводные унифицированные каталоги землетрясений отдельных районов Арктики за весь инструментальный период.

Разработанная совокупность технических решений, направленная на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений западного сектора Российской Арктики, и сравнение с ранее использованными подходами представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Совокупность технических решений, направленная на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений в западном секторе Российской Арктики

Технические решения по определению основных параметров (гипоцентр, магнитуда) землетрясений			
	В ранних исследованиях на разных временных этапах	В настоящем исследовании	
Исходные данные	– доступные исследователям бюллетени и исходные данные сейсмических станций; – Shide Circulars (1899–1912); – ISA bulletins (1895–1897, 1903–1908); – Бюллетени ПЦСК (1902–1907, 1911–1912); – BAAS (1913–1918); – International Seismological Summary (1918–1963); – Сводный кварталный бюллетень сети телесеизмических станций (1928–1939);	Для землетрясений, зарегистрированных в XX веке 1. Создан сводный электронный архив, содержащий: – бюллетени сейсмических станций из следующих источников: • Архивы проектов «Historical Seismogram Filming Project», «USGS WWFC Pilot Scanning Project», ISC-GEM, EuroSeismos и IASPEI; • Архив ФИЦ ЕГС РАН; • Архив ГЦ РАН • Фонд Российской государственной библиотеки;	Для землетрясений, зарегистрированных в XXI веке 1. Объединение исходных цифровых данных сейсмических станций, функционирующих в регионе, из следующих источников: – Международные и национальные фонды, объединения и программы, такие как FDSN,

	<p>– Копии записей Б. Гетенберга «Gutenberg Notepads» [Goodstein et al., 1980; Di Giacomo et al., 2015];</p> <p>– BCIS bulletins (1930–1971);</p> <p>– Бюллетень сети сейсмических станций СССР/Сейсмологический бюллетень сети опорных сейсмических станций СССР (1940–1987);</p> <p>– Бюллетень International Seismological Centre (1964 – по настоящее время);</p> <p>– Бюллетень NEIC (1973 – по настоящее время);</p> <p>– Бюллетень ФИЦ ЕГС РАН (1994 – по настоящее время);</p> <p>– Международные и национальные фонды, объединения и программы, такие как GEOFON, ORFEUS и IRIS.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Архив д-ра Й. Швейцера (J. Schweitzer, University of Oslo) [Schweitzer, Lee, 2003]; • Фрагменты бюллетеней из научных статей и монографий. <p>– Сводные бюллетени:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Shide Circulars (1899–1912); • ISA bulletins (1895–1897, 1903–1908); • Бюллетени ПЦСК (1902–1907, 1911–1912); • BAAS (1913–1918); • International Seismological Summary (1918–1963). <p>– Сведения о сейсмических станциях начала XX века.</p> <p>2. Привлекались данные:</p> <p>– Бюллетень сети сейсмических станций СССР/Сейсмологический бюллетень сети опорных сейсмических станций СССР (1954–1970);</p> <p>– Bulletin of the International Seismological Centre (1964 – по настоящее время);</p> <p>– NEIC bulletin (1973 – по настоящее время);</p> <p>– Бюллетени ФИЦ ЕГС РАН (1994 – по настоящее время).</p>	<p>GEOFON, ORFEUS и IRIS.</p> <p>– Архив ФИЦКИА УрО РАН.</p> <p>– Архив ФИЦ ЕГС РАН.</p> <p>2. Бюллетень International Seismological Centre;</p> <p>3. Бюллетень ФИЦКИА УрО РАН</p> <p>4. Бюллетень ФИЦ ЕГС РАН;</p> <p>5. Сводный бюллетень для Европейской Арктики за период с 1990 по 2013 гг. [Schweitzer et al., 2021].</p>
Скоростная модель	<p>– модель Р. Олдхэма [Oldham, 1900];</p> <p>– JB [Jeffreys, Bullen, 1940];</p> <p>– PREM [Dziewonski, Anderson, 1981];</p> <p>– iasp91 [Kennett, Engdahl, 1991];</p> <p>– ak135 [Kennett et al., 1995; Kennett, 2005].</p>	<p>– ak135 [Kennett et al., 1995; Kennett, 2005];</p> <p>– новые и апробированные региональные скоростные модели BARENTS [Kremenetskaya et al., 2001], NOES [Морозов, Ваганова, 2017], NORP [Морозов, Ваганова, 2011] и NOES_hybrid [Морозов и др., 2023].</p> <p>– комбинированная скоростная модель для Евразийской Арктики, представляющая собой совокупность 11 одномерных скоростных моделей, каждая из которых работает в заданной географической области.</p>	
Алгоритм локации	<p>Различные методы локации, применяемые в сейсмологии, описаны в работах [Havskov, Ottemöller, 2010; Karasözen, Karasözen, 2020].</p>	<p>– Алгоритм программы ProLom (Probabilistic Locator by Macro-seismics) [Асминг, Морозов, 2023], основанный на предложенном в [Морозов, Асминг, 2023] методе вероятностной локации землетрясений на основе совместного анализа макросейсмических и инструментальных данных.</p> <p>– Новый алгоритм локации программы NAS (New Association System) [Асминг и др., 2021], основанный на комбинации двух методов – максимизации рейтинговой функции на сетке, являющегося совершенствованием метода Generalized beamforming</p>	

		[Ringdal, Kvaerna, 1989], и минимизации невязки оценки времени в очаге. – Алгоритм программы JHD (созданный В.Э. Асмингом), реализующий метод локации относительно сильного землетрясения (arrival-time difference (ATD) technique) [Spence, 1980].
Оценка магнитуд	– <i>ML</i> [Richter, 1935, 1958]; – <i>mB/MS</i> по Б. Гутенбергу [Gutenberg, 1945]; – <i>MS</i> [Ванек и др., 1962]; – <i>MLH</i> [Новый каталог..., 1977]; – <i>M_w</i> [Kanamori, 1977]; – <i>MS_{BB}/m_B_{BB}</i> [Bormann, Saul, 2008].	При отсутствии значений магнитуд, вычисленных в ISC, вычислялись магнитуды: – <i>MS</i> по [Ванек и др., 1962]; – <i>ML</i> [Richter, 1935]. Для региональных землетрясений западной сектора Российской Арктики использовалась уточненная шкала локальной магнитуды <i>ML</i> [Морозов и др., 2020]. Использовались соотношения между магнитудами разных типов, вычисленные в разных зарубежных и отечественных региональных сейсмологических Центрах и описанные в [Морозов, Ваганова, 2022], в совокупности с результатами подобных исследований [Аветисов, 1996; Di Giacomo et al., 2015; Petrova, Gabsatarova, 2020; Петрова, Курова, 2023].

Выводы главы 2

Создана совокупность технических решений, направленная на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений западного сектора Российской Арктики, включающая в себя: новые и апробированные региональные одномерные скоростные модели; комбинированную модель, состоящую из 11 региональных моделей; уточненную шкалу локальной магнитуды *ML* и корреляционные связи между магнитудами разных типов, вычисленными в различных сейсмологических центрах; новый метод вероятностной локации раннеинструментальных землетрясений; применение современного алгоритма локации; созданный сводный электронный архив бюллетеней сейсмических станций первой половины XX века и интеграция цифровых данных отечественных и зарубежных сейсмических станций, функционирующих в XXI веке.

Глава 3. Сейсмичность Арктики в начале XX века

В главе представлены результаты обобщения сведений о землетрясениях Арктики, произошедших в начале XX века, уточнения основных параметров их очагов и создания уточнённого каталога с параметрами очагов для большей части рассмотренных землетрясений существенно отличными от первоначальных, указанных в различных источниках. Определение основных параметров гипоцентров проводилось на основе совокупности технических решений, описанной в главе 2.

Развитие инструментальных наблюдений в Европе в конце XIX и начале XX веков, особенно с открытием сейсмических станций Bergen (1904), Vassijaure (1906), Pulkovo (1906) и Reykjavik (1909), позволило инструментально регистрировать колебания от отдельных наиболее сильных землетрясений в Арктике. Первые обобщения о сейсмичности Арктического региона можно найти в работах [Tams, 1922, 1927; Hodgson, 1930; Gutenberg, Richter, 1941, 1954; Emery,

1949; Лунден, 1959]. Параметры гипоцентров арктических землетрясений, вычисленные исследователями в первой половине XX века, до сих пор используются при создании современных каталогов землетрясений. Однако они основаны на данных бюллетеней лишь части сейсмических станций, функционировавших в тот период, на устаревших скоростных моделях и алгоритмах локации.

На основе данных из [Tams, 1922, 1927; Gutenberg, Richter, 1954; Лунден, 1959; Новый каталог..., 1977], International Seismological Summary за период с 1917 по 1919 гг. и каталога ISC-GEM [Storchak et al., 2015] составлен предварительный сводный каталог землетрясений, произошедших за период с 1904 по 1920 гг., и эпицентры которых располагаются выше 70° с.ш. Каталог состоит из 25 землетрясений, большая часть которых представлена в разных источниках с разными параметрами очагов. Часть землетрясений представлены только в одном источнике и в более поздних работах не упоминаются.

Для каждого землетрясения производился поиск времен вступлений в бюллетенях сейсмических станций, функционировавших в тот период времени. Для этого был произведен поиск бюллетеней соответствующих сейсмических станций в источниках, указанных в таблице 1.

Для землетрясений рассчитывалась магнитуда MS по [Ванек и др., 1962]. Если для землетрясения была вычислена магнитуда Mw в каталоге ISC-GEM, то предпочтение давалось этой магнитуде. Из-за удалённости сейсмических станций и их малого количества невозможно было надёжно вычислить глубину землетрясений. Поэтому для каждого землетрясения расчет координат гипоцентров производился при определённой фиксированной глубине его очага. Очаг землетрясения не может располагаться выше некоторого H_{min} . Минимально возможная глубина очага землетрясений определялась из значений их магнитуд, согласно формуле Ю.В. Ризниченко [Ризниченко, 1979]:

$$M \leq 3.3 \log h + 3.1. \quad (4)$$

За первые два десятилетия XX века в Арктике было зарегистрировано 25 сильных землетрясений (Рис. 3), которые имеют большое значение как для понимания общих закономерностей сейсмического процесса в Арктике, так и для задачи оценки сейсмической опасности. Начало инструментального периода в Арктике можно отсчитывать с регистрации землетрясения 9 октября 1904 г. В период с 1904 по 1911 гг. сейсмическими станциями мировой сети в Арктике регистрировали землетрясения с магнитудами от 6.0. После 1912 г., уже регистрировать землетрясения с магнитудами от 5.0.

После процедуры уточнения эллипсы ошибок большинства землетрясений имеют большую площадь из-за узкого азимутального створа и удаленности сейсмических станций, что характерно для Арктики в тот период времени. Однако большая площадь эллипса ошибок не мешает однозначно отнести их эпицентры к определенным сейсмоактивным зонам. Большинство землетрясений приурочено к основным сейсмоактивным зонам Арктики – срединно-океаническим хребтам, архипелагу Шпицберген и шельфу моря Лаптевых.

На шельфе Баренцево моря в зоне перехода «континент-океан» к северо-западу от архипелага Земля Франц-Иосифа 14 октября 1908 г. произошло

землетрясение с магнитудой $M_w(ISC)=6.6$ (Рис. 4). Поскольку эллипс ошибок частично покрывает территорию желоба Франц-Виктория, можно предположить, что событие произошло именно в этом районе. Во-первых, эллипс ошибок не охватывает другие сейсмически активные зоны Баренцево-Карского региона. Во-вторых, сильные землетрясения регистрировались в районе грабена за инструментальный период. В-третьих, современные исследования слабой сейсмичности переходной зоны «континент-океан» подтверждают сейсмическую активность желоба Франц-Виктория [Конечная, 2015; Morozov et al., 2015].

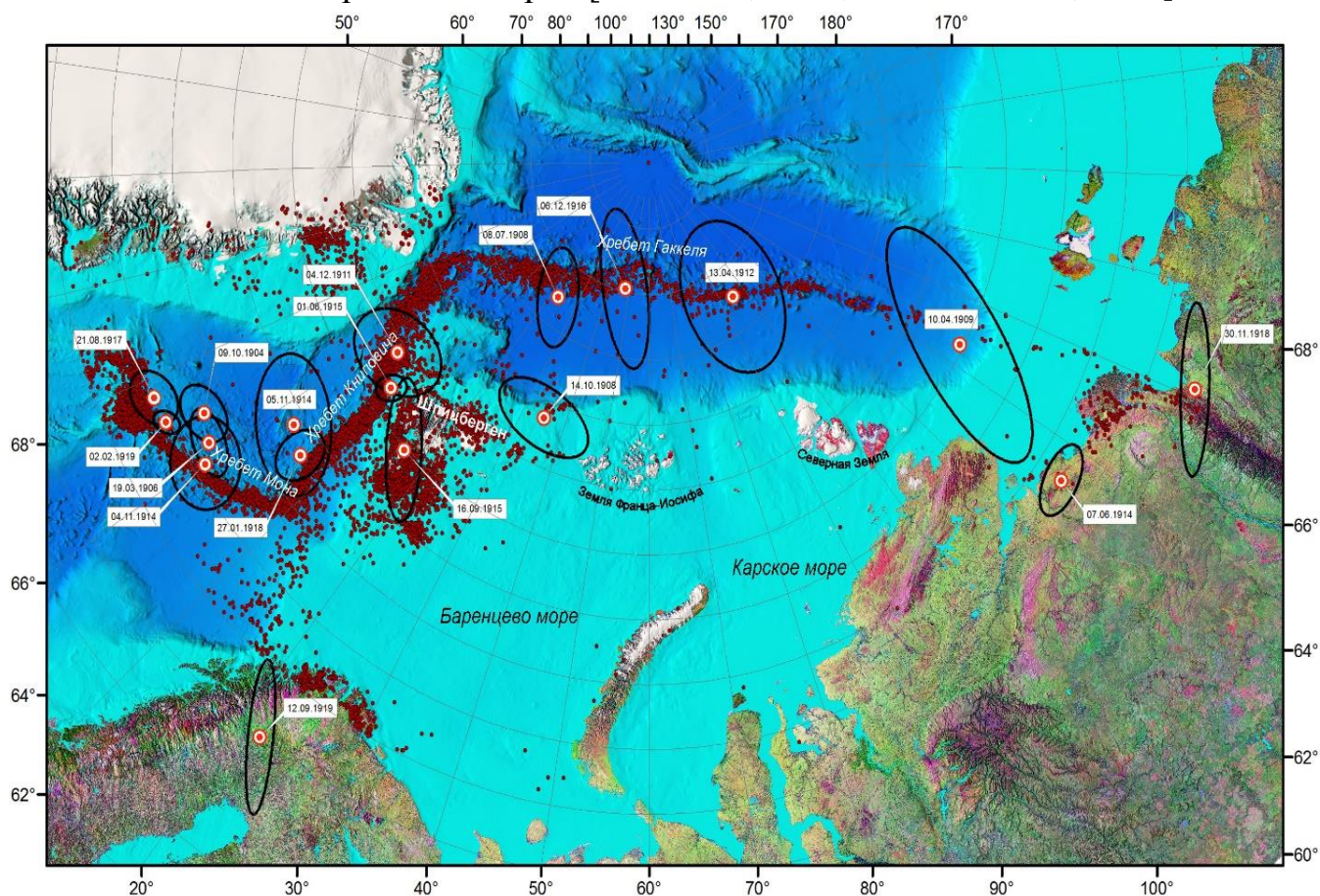


Рис. 3. Карта с обозначением уточнённых эпицентров землетрясений Арктики за период с 1904 по 1920 гг.

Сплошными кружками обозначены эпицентры землетрясений, зарегистрированные в Арктике (севернее 70° с.ш.) за период с 2000 по 2016 гг. по данным ISC [International ..., 2020]

Обратная ситуация наблюдается с землетрясением, зарегистрированным 13 апреля 1912 г. с магнитудой $M_S=5.1$. По данным [Gutenberg, Richter, 1954; Лунден, 1959], эпицентр землетрясения располагается в районе архипелага Северная Земля (Рис. 5). Однако после процедуры уточнения выяснилось, что эпицентр находился севернее архипелага, в районе срединно-океанического хребта Гаккеля. Вполне вероятно, что это землетрясение произошло именно на хребте Гаккеля, а не у архипелага Северная Земля, т.к. в течение всего инструментального периода сильных землетрясений в районе архипелага не регистрировалось [Morozov et al., 2018]. Результаты мониторинга по данным стационарной сейсмической станцией SVZ, установленной на архипелаге в 2016 г., не указывают на наличие сейсмоактивных зон непосредственно в районе архипелага.

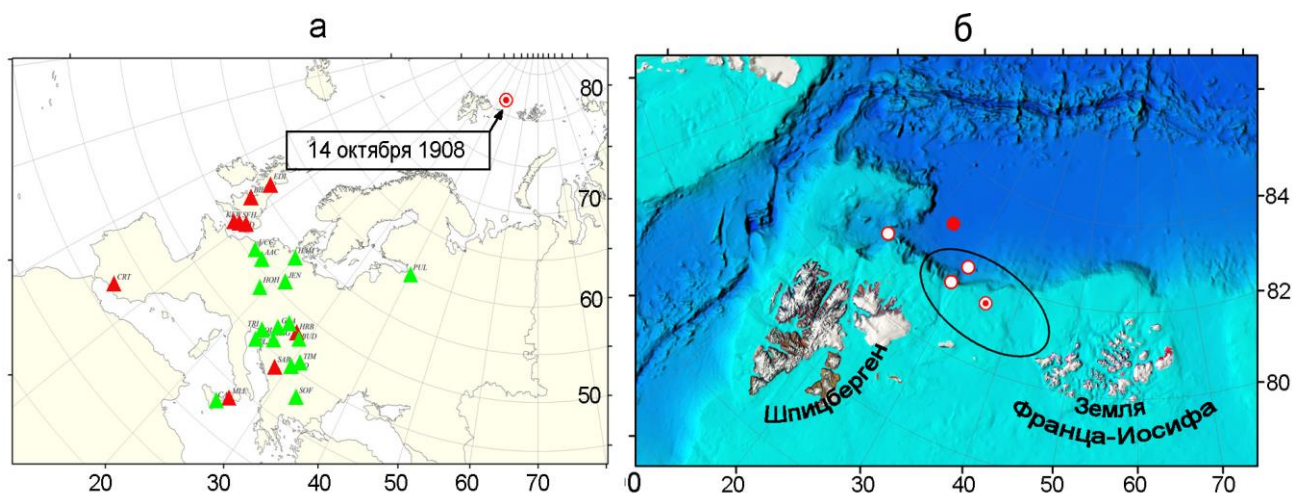


Рис. 4. Карта сейсмических станций (слева), зарегистрировавших землетрясение 14 октября 1908 г., и карта (справа) с уточнённым эпицентром землетрясения (кружок с точкой) и эпицентрами по [Tams, 1922; Gutenberg, Richter, 1954; Линден, 1959] (полые кружки).

Красным кружком отмечен эпицентр из каталога ISC-GEM [Storchak et al., 2015]. Зелеными треугольниками показаны станции, времена вступлений которых использовались в процедуре уточнения; красными треугольниками отмечены станции, для которых времена вступлений от землетрясения были отклонены. Эллипс ошибок отображается черной линией.

Четыре землетрясения, произошедшие 09 октября 1904 г., 8 июля 1908 г., 4 декабря 1911 г. и 25 января 1912 г., опубликованы только в работе [Tams, 1922] и не упоминаются впоследствии в более поздних научных работах и каталогах, т.е. они являются «забытыми» землетрясениями. Для семи землетрясений из 25 не удалось обнаружить вступления в доступных бюллетенях сейсмических станций. Поэтому остается нерешенным вопрос, действительно ли эти землетрясения произошли в арктическом регионе. Эти землетрясения требуют дополнительных исследований, включающих анализ уже сейсмограмм сейсмических станций, а не их бюллетеней.

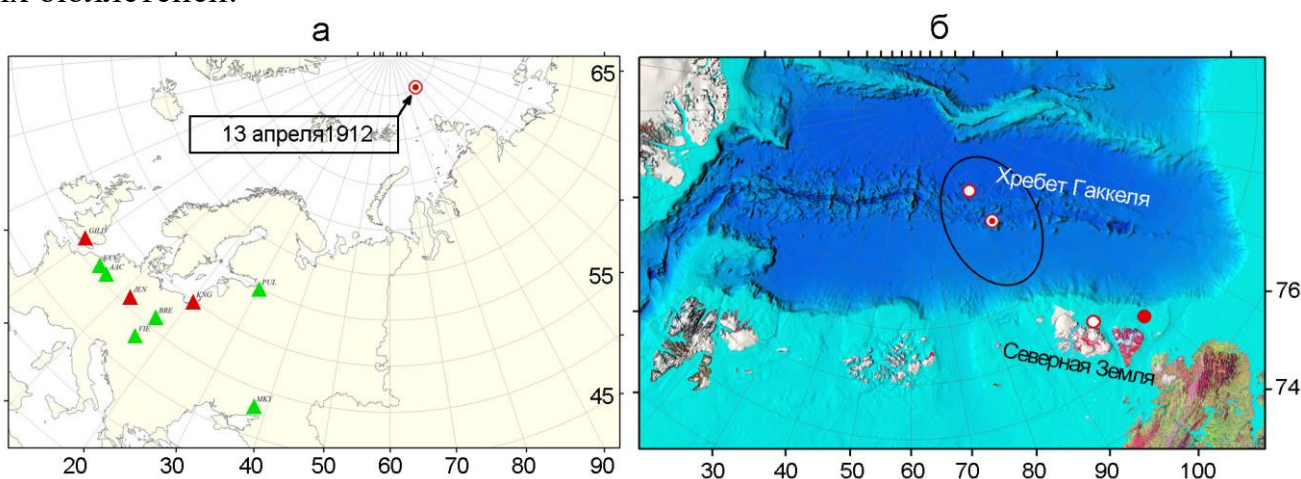


Рис. 5. Карта сейсмических станций (слева), зарегистрировавших землетрясение 13 апреля 1912 г., и карта (справа) с уточнённым эпицентром землетрясения (кружок с точкой) и эпицентрами по [Tams, 1922; Линден, 1959] (полые кружки). Красным кружком отмечен эпицентр по [Gutenberg, Richter, 1954]. Остальные обозначения аналогичны рисунку 4.

Выводы главы 3

Параметры гипоцентров землетрясений, зарегистрированных в Арктике в начале XX века и вычисленные исследователями в первой половине XX века, до сих пор используются в современных каталогах землетрясений. Однако они вычислены чаще всего на основе данных бюллетеней лишь части сейсмических станций, функционировавших в начале XX века, с применением устаревших скоростных моделей и алгоритмов локации.

С применением совокупности технических решений, описанной в главе 2, создан уточнённый и унифицированный каталог раннеинструментальных землетрясений Арктики за период с 1904 по 1920 гг., включающий «забытые» сильные землетрясения, не упоминающиеся в современных каталогах, и содержащий параметры гипоцентров для большей части землетрясений, существенно отличные от первоначальных, приведенных в различных источниках.

Глава 4. Сейсмичность Баренцево-Карского региона

В главе описаны результаты исследований по уточнению основных параметров очагов землетрясений, зарегистрированных в Баренцево-Карском регионе в течение всего инструментального периода и созданию нового уточнённого и унифицированного каталога землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 гг., на основе совокупности технических решений, описанной в главе 2. Также в главе представлены результаты изучения современной слабой сейсмичности зоны перехода «континент-океан», территории ранее недоступной для детального сейсмического мониторинга.

Баренцево и Карское моря омывают северную оконечность Евразийского континента и занимают один из самых широких континентальных шельфов в мире. Шельф Баренцева и Карского морей является наиболее изученным в Арктическом регионе. Геолого-геофизические исследования в регионе показали, что его нефтегазовый потенциал создал возможность для открытия таких крупных месторождений, как Штокмановское, Ледовое, Лудловское, Приразломное и др. на Баренцевом шельфе и Русановское, Ленинградское на Карском шельфе [Ivanova et al., 2006].

Особенности развития инструментальных наблюдений напрямую влияли на сейсмологическую изученность этих территорий. Большой пласт исследований сейсмичности характерен для западной части Баренцево-Карского региона, которая имела хорошую инструментальную представительность практически в течение всего инструментального периода. Центральная и восточная части Баренцево-Карского региона, которые входят в западный сектор Российской Арктики, напротив, всегда имели слабую инструментальную представительность. Поэтому эти районы редко становились объектом исследования сейсмичности, за исключением архипелага Новая Земля с функционирующим до 1990 г. ядерным полигоном. А зона перехода «континент-океан» в плане изучения проявления слабой сейсмичности практически до настоящего времени относилась к малоизученной территории.

Составление сводного предварительного каталога землетрясений для западного сектора Российской Арктики за период с начала XX века по 2020 г. производилось в пределах границ района, указанного на рисунке 6, и на основе данных из различных источников, представленных на рисунке 7. Из предварительного каталога были исключены ядерные взрывы, произведенные на полигоне «Новая Земля», на основе открытых баз данных по ядерным взрывам [Yang et al., 2003; Халтурин и др., 2005], а также все сейсмические события, произошедшие непосредственно в районах ядерного полигона. Для каждого землетрясения производился поиск времен вступлений в бюллетенях сейсмических станций, функционировавших в тот период времени. В итоговый каталог не включались землетрясения, вступления от которых регистрировались менее тремя станциями.

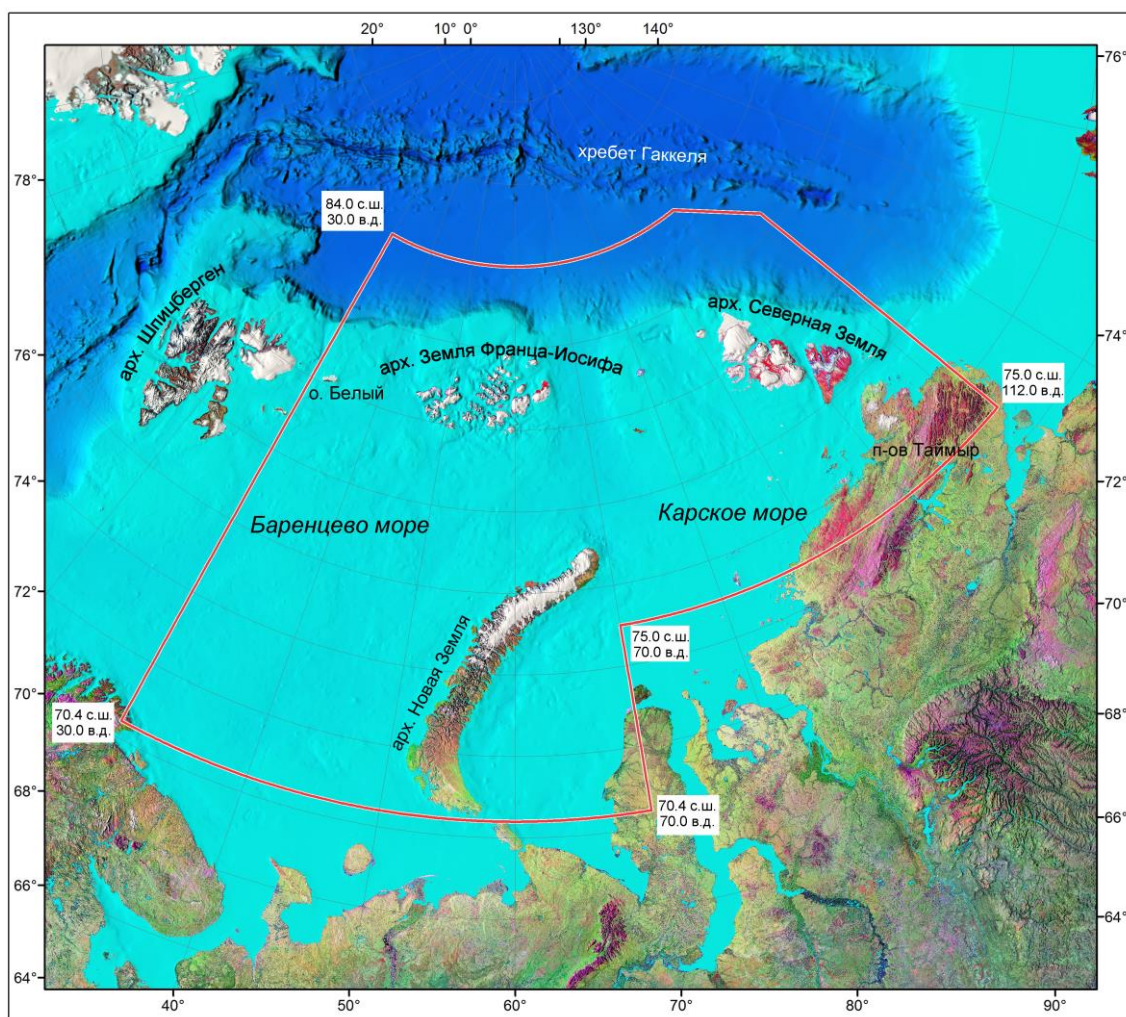


Рис. 6. Карта с обозначением района исследования

Итоговыми результатами исследования являются два каталога. Первый каталог представляет собой непосредственно сводный уточнённый и унифицированный каталог землетрясений для западного сектора Российской Арктики. Каталог содержит 125 землетрясений, зарегистрированных за период с 1908 по 2020 гг. Второй каталог включает в себя землетрясения, которые в различных источниках отнесены к району исследования, но в процессе уточнения

параметров очагов были приурочены к сейсмоактивным районам за пределами района исследования. Также землетрясения, для которых были обнаружены вступления сейсмических фаз на записях менее трёх сейсмических станций, т.е. не соблюдалось требование к минимальному количеству станций. Во второй каталог включены и сейсмические события, которые с большой вероятностью имеют техногенную природу.

Второй каталог содержит 31 сейсмическое событие, среди них 19 землетрясений, эпицентры которых в разных источниках находились в пределах западного сектора Российской Арктики, но после процедуры уточнения были приурочены к сейсмоактивным районам за пределом западного сектора. В основном, это районы хребта Гаккеля и архипелага Шпицберген. Для девяти землетрясений не обнаружено достаточного количества вступлений на сейсмических станциях. Для трёх сейсмических событий 1974, 1978 и 1989 гг. в каталоге указано, что они, вероятно, имеют техногенную природу. Уточнённые эпицентры событий 1974 и 1978 гг. попадают в район полигона на архипелаге Новая Земля, а эпицентр события 1989 г. – в район крупного промышленного карьера на Кольском полуострове. Данный факт косвенно указывает на техногенный тип их источника.

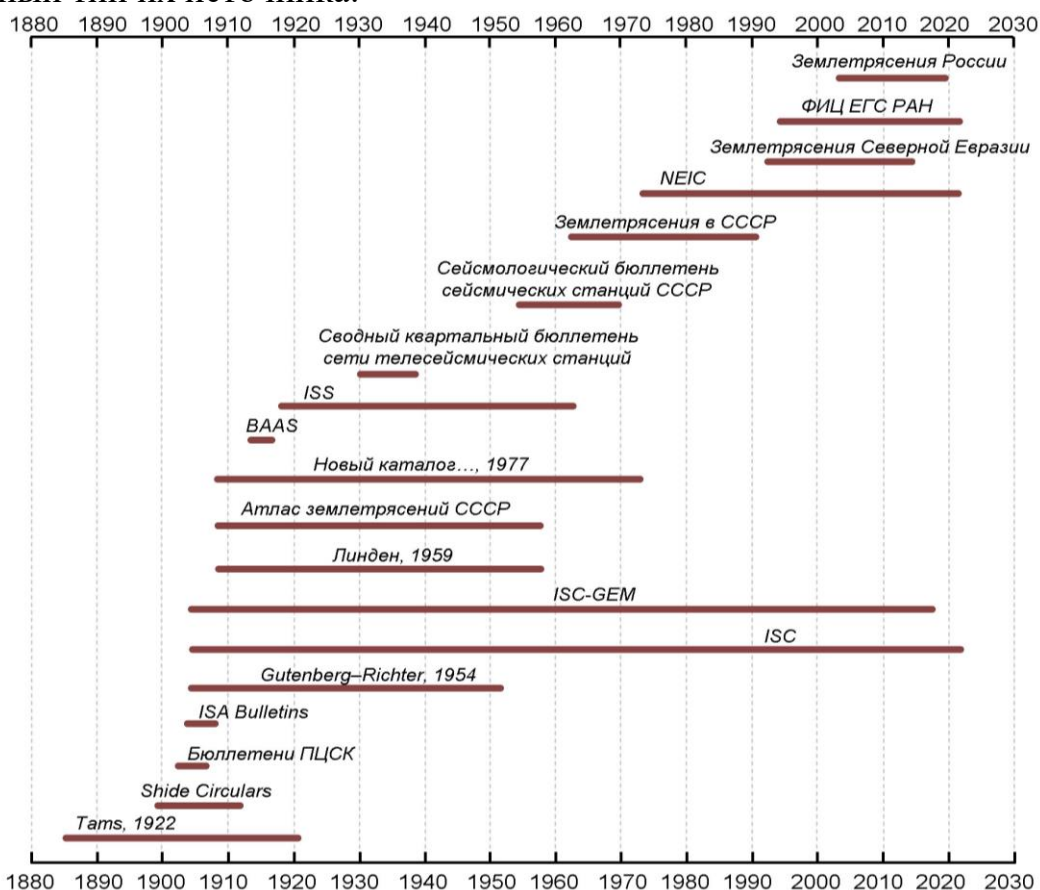


Рис. 7. Список использованных источников для поиска информации о землетрясениях, зарегистрированных в западном секторе Российской Арктики

Распределение количества землетрясений из уточнённого каталога по годам представлено на рисунке 8. Отчётливо видно, что с начала XX века и до 90-х годов регистрировались только единичные сейсмические события в пределах района

исследования. В период с 1990 по 2000 гг., несмотря на экономический кризис в России, закрытие одних сейсмических станций компенсировалось открытием новых и модернизацией действующих сейсмических станций [Старовойт, 2005; Маловичко и др., 2007; Виноградов и др., 2012]. Общее количество отечественных и зарубежных сейсмических станций в регионе увеличивалось. С этими процессами и связано увеличение в этот период количества зарегистрированных землетрясений в западном секторе Российской Арктики.

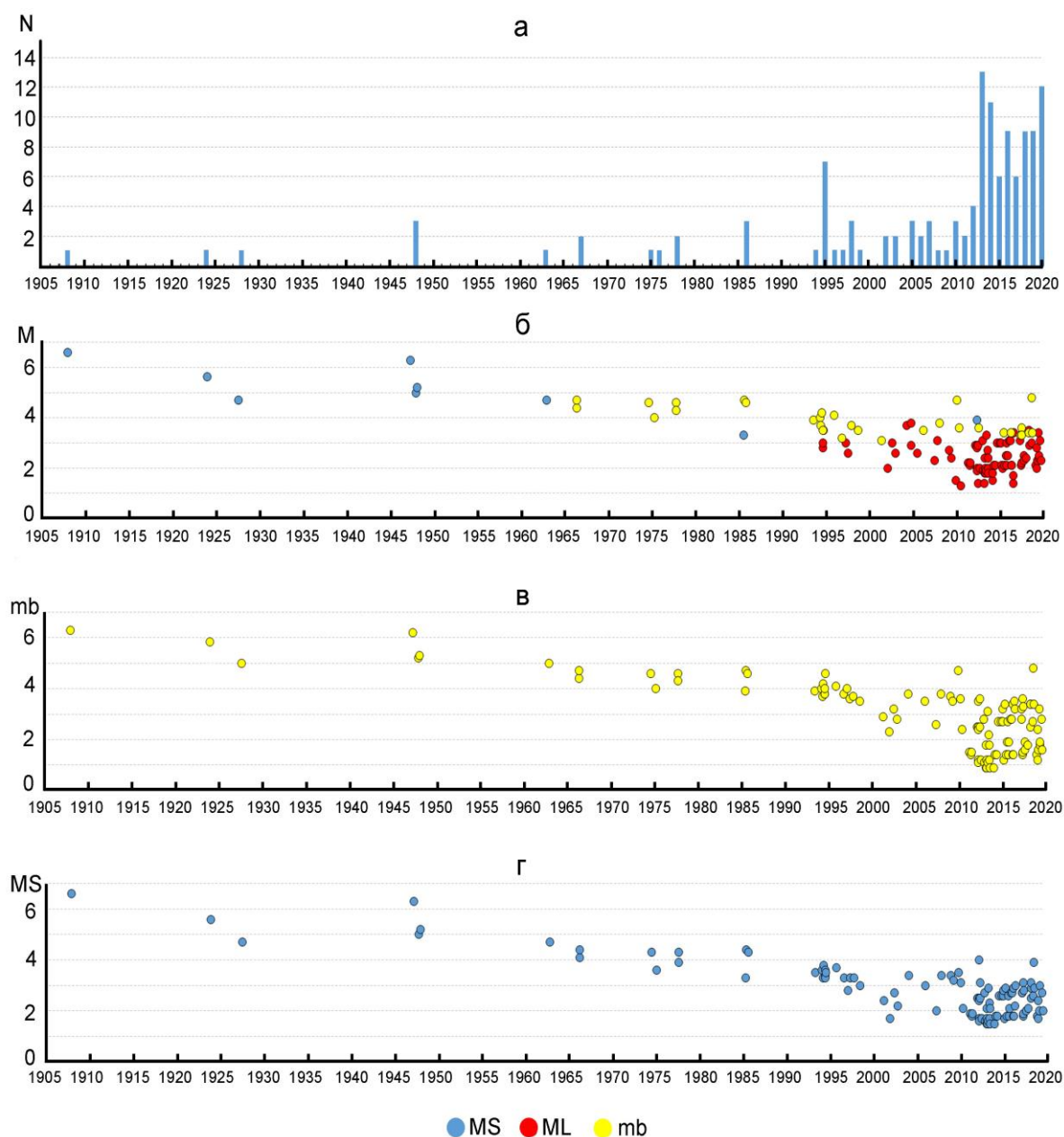


Рис. 8. Распределение землетрясений из созданного сводного уточнённого и унифицированного каталога землетрясений западного сектора Российской Арктики:

a – по годам; *б* – по магнитудам *mb*, *MS* и *ML*; *в* – по унифицированной магнитуде *mb*; *г* – по унифицированной магнитуде *MS*

Однако более 60% всех землетрясений из каталога было зарегистрировано в период начиная с 2012 по 2020 гг. Как уже отмечалось, в конце XX и в начале XXI

века произошло существенное увеличение количества российских и зарубежных сейсмических станций в Евразийской Арктике, оснащенных современной высокочувствительной аппаратурой, что сказалось на уменьшении порога регистрации землетрясений для отдельных районов Арктики.

Практически до 90-х годов в пределах западного сектора Российской Арктики регистрировались только сильные землетрясения с магнитудами M_S и m_b не ниже 4.0. Начиная с 90-х г. регистрируются землетрясения с магнитудами M_L не ниже 2.0. А после 2010 г., в связи со значительным увеличением количества стационарных сейсмических станций в регионе, землетрясения регистрируются с магнитудами M_L не ниже 1.3.

В пределах западного сектора Российской Арктики наибольшая сейсмичность проявляется в пределах зоны перехода «континент-океан» и о. Белый, архипелагов Новая Земля и Северная Земля (Рис. 9). Сам шельф Баренцева и Карского морей характеризуется редкой и рассеянной сейсмичностью. Также в район исследования попадают фрагменты сейсмичности, характерной для полуострова Таймыр и севера Фенноскандии.

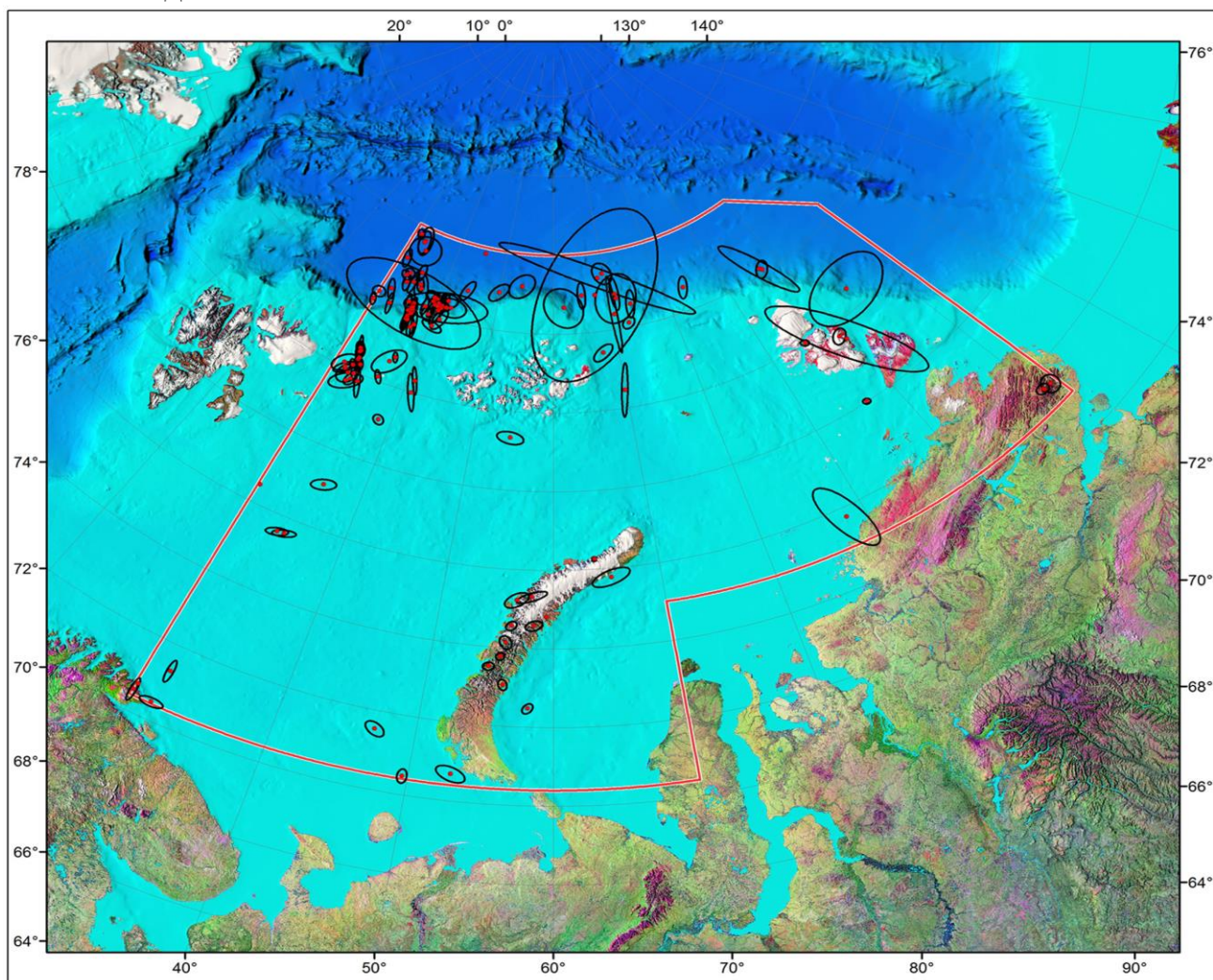


Рис. 9. Карт с обозначением эпицентров землетрясений из созданного сводного уточнённого и унифицированного каталога землетрясений западного сектора Российской Арктики

Главной особенностью распределения эпицентров землетрясений зоны перехода «континент-океан» является её неравномерность в пространстве. Прослеживается четкая приуроченность эпицентров к отрицательным морфоструктурам континентального склона – желобам (грабенам) и положительным – поднятиям. Большая часть зарегистрированных землетрясений приходится на желобы Франц-Виктория и Св. Анны. Желоб Франц-Виктория является одним из основных после архипелага Шпицбергена сейсмически активным районом в Баренцево-Карского регионе.

Архипелаг Новая Земля – крупнейший в Российской Арктике и расположен в восточной части Баренцева моря. Он включает в себя два крупных острова – Северный и Южный, которые разделены узким проливом Маточкин Шар (2–3 км) и множеством более мелких островов. До 1990 г. в пределах архипелага регистрировалась техногенная и индуцированная сейсмичность, вызванная деятельностью ядерного полигона [Khalturin et al., 2005; Адушкин, Спивак, 2007]. После 1990 г. в пределах архипелага было зарегистрировано 14 землетрясений, для которых была проведена процедура уточнения. Большинство эпицентров располагается в пределах о. Северный, преимущественно в южной его части и вдоль западного побережья, и могут быть приурочены к субмеридиональным разломам.

Для большинства землетрясений в пределах архипелага удалось вычислить диапазоны возможных глубин. Для землетрясений, произошедших в пределах о. Северный, характерны глубины в нижнем слое коры. Землетрясения, произошедшие в районе о. Южный и в акваториях Баренцева и Карского морей, диапазон возможных глубин располагается в верхней части коры.

Только землетрясение 19 октября 1924 г. из всех землетрясений первой половины XX века можно отнести к континентальному склону вблизи от архипелага. Остальные были отнесены к хребту Гаккеля. В каталоге [Новый каталог..., 1977] указана магнитуда этого землетрясения, равная $MLH=4.5$. Было пересчитано значение магнитуды $MS=5.6$, согласно (1), по значениям амплитуд и периодов, указанных в бюллетенях четырёх сейсмических станций.

Непосредственно в пределах архипелага было зарегистрировано три землетрясения с унифицированными магнитудами M от 3.5 до 4.3. Только для землетрясения 7 августа 1978 г., произошедшего в $13^{\text{h}}35^{\text{m}}$, была вычислена глубина очага, равная 10 км. Для остальных землетрясений принималось минимально возможное значение глубины в зависимости от магнитуды.

Было выполнено сравнение параметров ЛДФ-моделей карт ОСР-97 и ОСР-2016 с инструментальными данными за период с 1908 по 2020 гг. из итогового каталога (Рис. 10, 11). На основе результатов сравнения формулировались определённые выводы для каждой из ЛДФ-модели. Конфигурация, значения максимально возможных магнитуд и глубина сейсмогенных слоёв доменов ЛДФ-моделей карт ОСР не всегда соответствуют инструментальным данным и требуется их корректировка. Поэтому на основе выводов были сформулированы рекомендации по изменению границ доменов, значений глубин доменов и значений максимальных магнитуд, представленные в таблице 2.

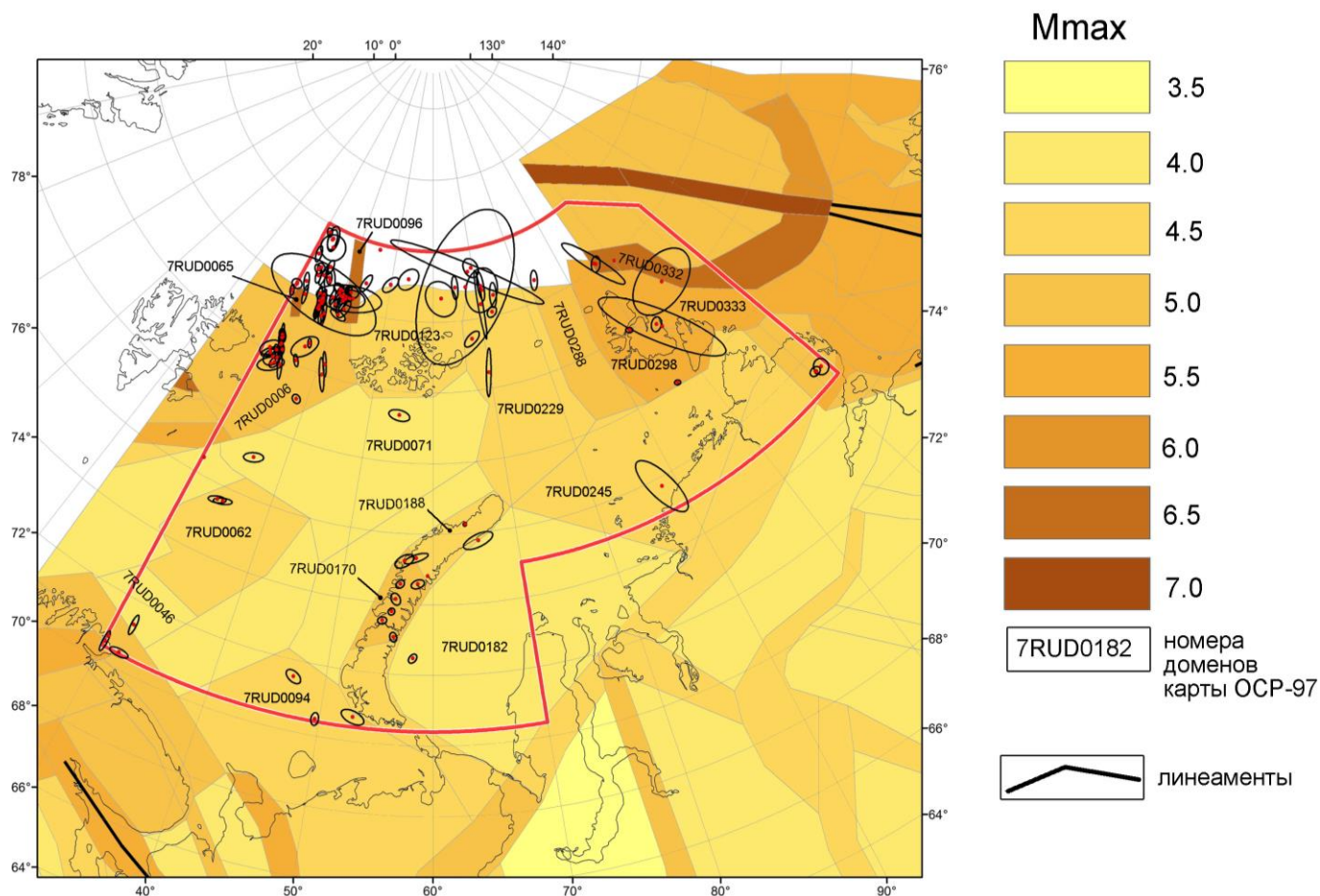


Рис. 10. Фрагмент ЛДФ-модели карты OCP-97

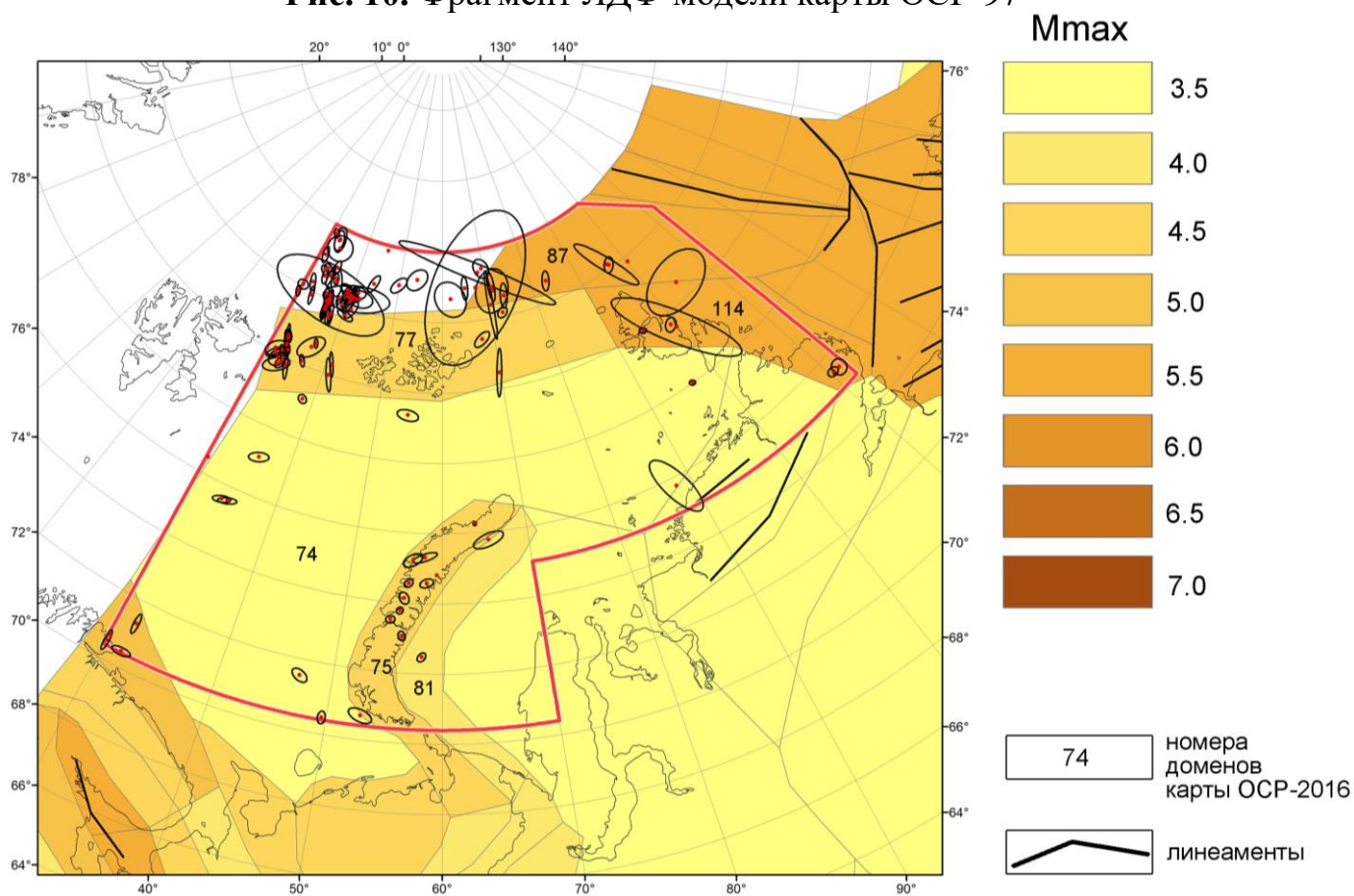


Рис. 11. Фрагмент ЛДФ-модели карты OCP-2016

Таблица 2 – Выводы и рекомендации, сформулированные на основе сравнения параметров ЛДФ-моделей карт ОСР-97 и ОСР-2016 с инструментальными данными за период с 1908 по 2020 гг. из итогового каталога

ОСР-97	
Выводы	Рекомендации
1. ЛДФ-модель ограничивается бровкой континентального шельфа, поэтому большое количество землетрясений, происходящих непосредственно в устьевых зонах желобов, у основания континентального склона и аббисальной равнине, не учитываются моделью	1. Расширить ЛДФ-модель за пределы бровки континентального склона, чтобы учесть сейсмичность в устьевых зонах желобов, основании континентального склона и аббисальной равнине.
2. Эпицентр самого сильного землетрясения 14 октября 1908 г. с $M=6.6$, после процедуры уточнения его основных параметров сместился на запад в район устья желоба Франц-Виктория ближе к эпицентру другого сильного землетрясения 18 февраля 1948 г с $M=6.3$. Поэтому эпицентр, который ранее был приурочен к домену №7RUD0065 с максимальной магнитудой 6.5, в настоящее время находится в районе домена №7RUD0006 с максимальной магнитудой 5.0.	2. Изменить конфигурацию и увеличить площадь домена №7RUD0065 в районе устья желоба Франц-Виктория, характеризующегося $M_{max}=6.5$.
3. Эпицентр землетрясения 2 июня 1928 г. с $M=4.7$ после процедуры уточнения сместился к устью желоба Святой Анны. Значение магнитуды землетрясения незначительно превышает значение максимальной магнитуды домена №7RUD0229 $M=4.5$, располагающегося в районе желоба.	3. Увеличит значение M_{max} с 4.5 до 5.0 для домена №7RUD0229, располагающегося в районе желоба Святой Анны.
4. Магнитуды землетрясений в районе архипелага Новая Земля не превышают значений M_{max} доменов №№7RUD0094, 7RUD0170, 7RUD0188, но их глубины (от 20 до 40 км) располагаются ниже глубин (от 1 до 6 и от 9 до 14 км) соответствующих доменов.	4. Изменить, либо расширить диапазон глубин сейсмогенных слоёв для доменов №№7RUD0094, располагающихся в районе архипелага Новая Земля, чтобы они покрывали глубины от 20 до 40 км.
5. После процедуры уточнения эпицентр землетрясения 13 апреля 1912 г. с $M=5.2$ из района архипелага Северная Земля был смещён к хребту Гаккеля. В результате значения магнитуд (от 3.5 до 4.3) оставшихся землетрясений, зарегистрированных в пределах архипелага, значительно ниже значений	5. Возможно, необходимо понизить значения M_{max} для доменов №№7RUD0298 и 7RUD0333 у архипелага Северная Земля с 5.5 до
6. Для домена №7RUD0245, располагающегося на шельфе Карского моря у побережья полуострова Таймыр, также выявлено незначительное превышение магнитуды единственного землетрясения $M=4.7$ по сравнению с $M_{max}=4.5$.	6. Необходимо увеличит значение №7RUD0245, располагающегося на шельфе Карского моря у побережья полуострова Таймыр.
ОСР-2016	
Выводы	Выводы
1. ЛДФ-модель ограничивается бровкой континентального шельфа, поэтому большое количество землетрясений, происходящих непосредственно в устьевых зонах желобов, у	1. Расширить ЛДФ-модель за пределы бровки континентального склона, чтобы учесть сейсмичность в устьевых зонах желобов,

основания континентального склона и аббисальной равнине, не учитываются моделью	основании континентального склона и аббисальной равнине.
2. Район устья желоба Франц-Виктория, в котором произошло два самых сильных землетрясения во всем западном секторе Российской Арктики 14 октября 1908 г. с $M=6.6$ и 18 февраля 1948 г. с $M=6.3$ не отражён в ЛДФ-модели;	2. Необходимо разделить единый домен №77 на несколько, т.к. уровень сейсмичности для разных районов домена заметно отличается. Создать домен с в районе устья желоба Франц-Виктория с
Магнитуды землетрясений в районе архипелага Новая Земля не превышают значения M_{max} для домена №75, но их глубины (от 20 до 40 км) располагаются ниже глубины (от 1 до 9 км) соответствующего домена.	3. Изменить, либо расширить диапазон глубин для домена №75, располагающихся в районе архипелага Новая Земля, чтобы он покрывал глубины от 20 до 40 км.
4. После процедуры уточнения эпицентр землетрясения 13 апреля 1912 г. с $M=5.2$ из района архипелага Северная Земля был смещён к хребту Гаккеля. В результате значения магнитуд (от 3.5 до 4.3) оставшихся землетрясений, зарегистрированных в пределах архипелага, значительно ниже $M_{max}=5.5$ для домена №114.	4. Возможно, необходимо понизить значения M_{max} для домена №114 у архипелага Северная Земля с 5.5 до
Для домена № 74, располагающегося на шельфе Баренцева и Карского морей, выявлено превышение магнитуды произошедшего в районе полуострова Таймыр землетрясения с $M=4.7$ по сравнению с $M_{max}=3.5$. Однако эллипс этого землетрясения пересекает линеамент с магнитудой $M_{max}=6.0$.	

Современная сейсмичность зоны перехода «континент-океан»

Сейсмический мониторинг зоны перехода «континент-океан» проводился на основе данных сейсмических станций Архангельской сети (код сети АН), функционирующих на архипелагах Земля Франца-Иосифа (ZFI и OMEGA) и Северная Земля (SVZ) за период с октября 2011 по ноябрь 2020 гг. с применением совокупности технических решений, описанной в главе 2.

Землетрясения, произошедшие на исследуемой территории в период с октября 2011 г. по ноябрь 2020 г., были зарегистрированы разным количеством сейсмостанций. Одна часть землетрясений была зарегистрирована тремя и более станциями, другая часть – только двумя станциями. Некоторые землетрясения были зарегистрированы только одной единственной сейсмической станцией. Для локации землетрясений, зарегистрированных тремя и более станциями, использовался алгоритм программы NAS (New Association System) [Asming et al., 2021]. Для локации землетрясений, зарегистрированных только двумя станциями, использовался метод «circle and chord» [Havsko et al., 2009], реализованный в программе WSG (Windows Seismic Grafer) и разработанной в ФИЦ ЕГС РАН [Акимов, Красилов, 2020]. Для землетрясений, зарегистрированных только одной сейсмостанцией, использовался алгоритм программы EL (Event Location) [Асминг, 2004]. Чтобы определить местонахождение сейсмического события с помощью одной станции, алгоритм EL использует расстояние, определяемое разницей во

времени S - P , и обратный азимут, вычисленный по поляризации P -волны. Глубина предполагается 5 км. Чтобы свести к минимуму возможную неопределенность местоположения таких землетрясений, были проанализированы только землетрясения с четкими приходами P и S , т.е. с высоким отношением сигнал/шум.

Всего в зоне перехода «континент-океан» с октября 2011 г. по ноябрь 2020 г. было зарегистрировано 192 землетрясения. Только 87 землетрясений зарегистрировано тремя и более сейсмостанциями, 36 землетрясений зарегистрировано двумя станциями. А 69 землетрясений зафиксировала только одна сейсмостанция. Магнитуды землетрясений ML колеблются от 0.7 до 3.9 (Рис. 12). Почти половина всех зарегистрированных землетрясений имеет магнитуду 2.1 или ниже. Землетрясения с магнитудой 3.0 и выше составляют всего 20% от общего числа.

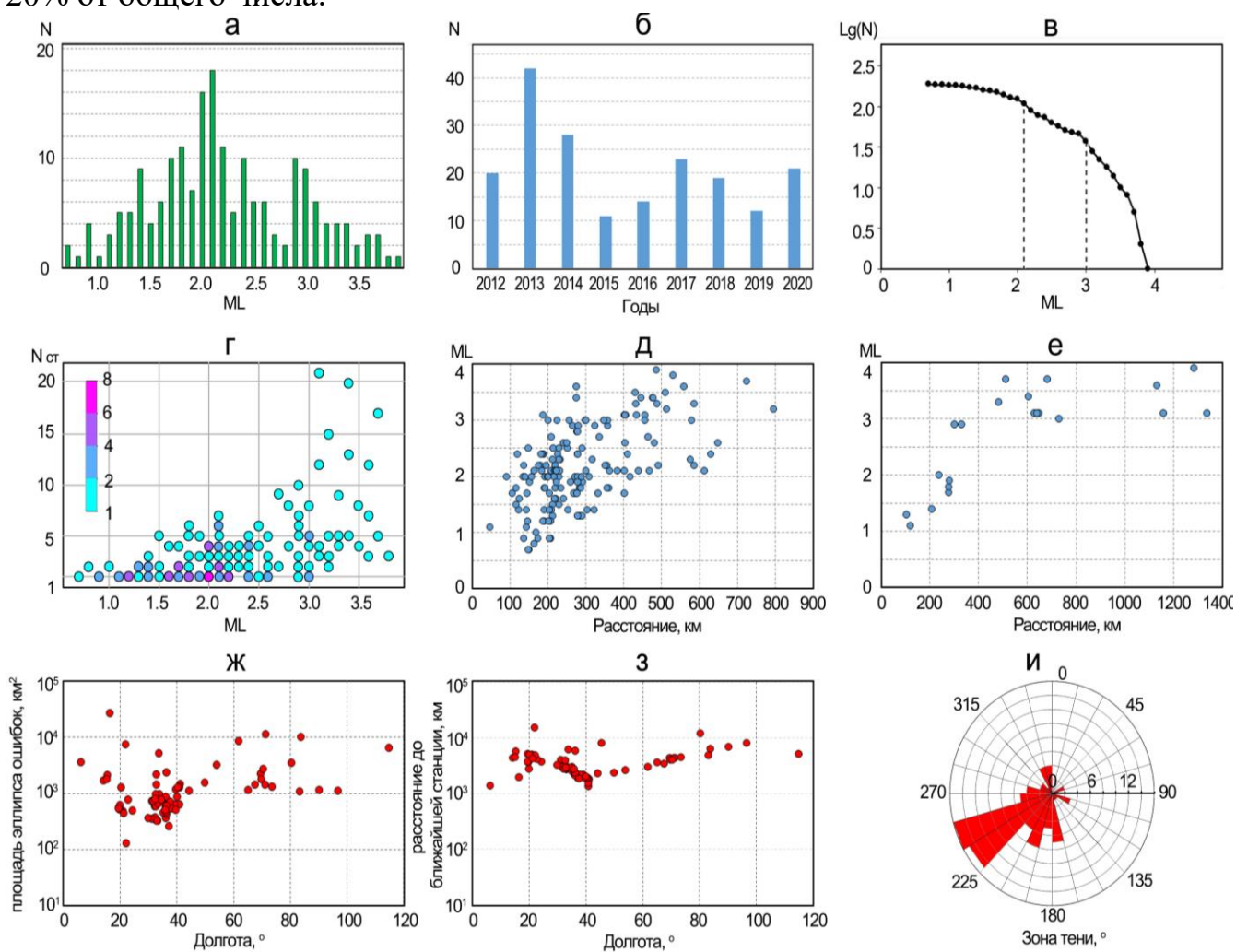


Рис. 12. Анализ данных каталога землетрясений:

a – распределение количества зарегистрированных землетрясений по их магнитуде; b – распределение числа зарегистрированных землетрясений по годам; v – кумулятивный график повторяемости; $г$ – количество станций, зарегистрировавших землетрясения в зависимости от их магнитуды; $д, e$ – распределение магнитуд землетрясений в зависимости от расстояния до сейсмостанции ZFI ($д$) и SVZ (e); $ж$ – распределение площади эллипса ошибок землетрясений в зависимости от долготы; $з$ – распределение значений расстояний от эпицентров землетрясений до ближайшей сейсмической станции в зависимости от долготы; $и$ – распределение значений зоны тени при локации зарегистрированных землетрясений

Эпицентры зарегистрированных землетрясений распределены в пространстве неравномерно в пределах района исследования (Рис. 13). Прослеживается четкая приуроченность эпицентров к отрицательным морфоструктурам континентального склона – желобам (грабенам) и положительным - поднятиям. Большая часть зарегистрированных землетрясений приходится на желобы Франц-Виктория и Св. Анны. В районе самих желобов эпицентры землетрясений также расположены неравномерно.

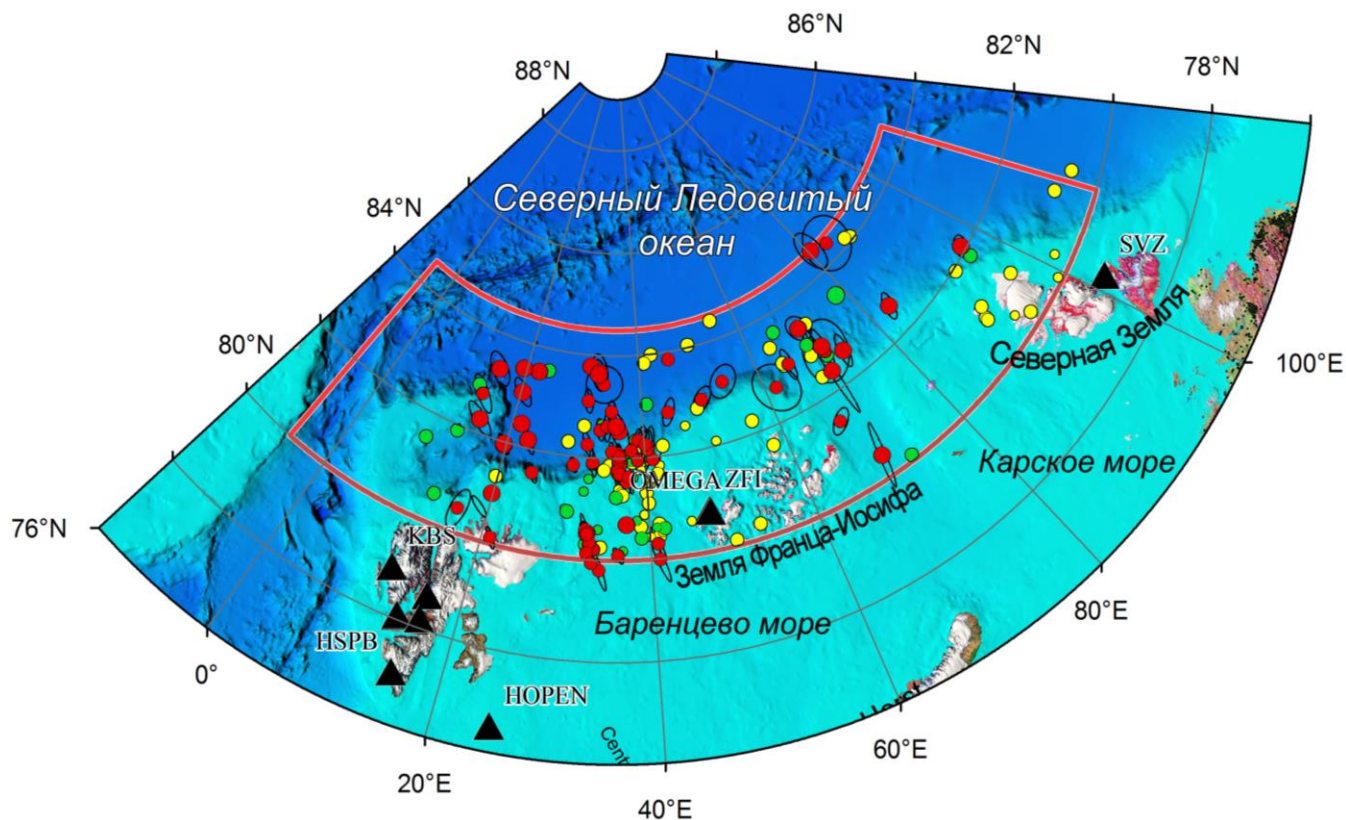


Рис. 13. Распределение эпицентров землетрясений в пределах зоны перехода «континент-океан» за период с декабря 2011 по ноябрь 2020 гг.

Красными кружками указаны эпицентры землетрясений, зарегистрированные тремя и более сейсмическими станциями. Зелёными кружками – двумя станциями. Желтыми кружками – одной станцией

В районе желоба Франц-Виктория эпицентры землетрясений тяготеют к нескольким его частям. Большинство эпицентров располагаются в устьевой части грабена, непосредственно у континентального склона, и на границе грабена с поднятием Белый и Виктория, в его северной и южной частях. Сейсмическая активность наблюдается также в пределах самого восточного о. Белый (Kvitøya) архипелага Шпицберген, который также относится к поднятию Белый и Виктория.

Эпицентры землетрясений, зарегистрированные в районе желоба Св. Анны, также тяготеют к его широкой устьевой части в районе континентального подножия. Часть землетрясений приурочена к центральной части желоба. Количество и магнитуда зарегистрированных землетрясений также может свидетельствовать о сейсмической активности данного района (Рис. 13).

Западнее желоба Франц-Виктория располагается желоб Орле. Его особенность в том, что исследования теплового потока, проведенные в районе желоба Орла,

показали аномально высокие значения от 300 до 520 $mВт/м^2$, что почти в 10 раз выше уровня фоновых значений [Хуторской и др., 2009]. Аномально высокий поток характерен для всего желоба Орле и для его продолжения на континентальном склоне вплоть до изобары в 1200 м. Авторы исследования [Хуторской и др., 2009] предполагают в районе желоба деструкцию коры на всю её мощность с внедрением в фундамент горячего мантийного вещества, что говорит уже об активной фазе развития грабена. Высокой температурой в коре можно объяснить практически полное отсутствие зарегистрированных землетрясений из района грабена Орле. Только два землетрясения можно отнести к району желоба. Далее на запад в районе плато Ермака мы наблюдаем сейсмичность, приуроченную к склонам плато (Рис. 13).

Западнее архипелага Северная Земля расположен желоб Воронина. Желоб характеризуется полным отсутствием зарегистрированных землетрясений, что также является одной из особенностей в распределении эпицентров в пределах района исследования.

Выводы главы 4

Центральная и восточная части Баренцево-Карского региона, которые входят в западный сектор Российской Арктики, всегда имели слабую плотность инструментальных сейсмометрических наблюдений. Поэтому эти районы редко становились объектом исследования сейсмичности, за исключением архипелага Новая Земля с функционирующим до 1990 г. ядерным полигоном.

В ходе многолетних исследований по сведению, уточнению и унификации основных параметров, зарегистрированных в пределах западного сектора Российской Арктики землетрясений, и с применением совокупности технических решений, описанной в главе 2, создан новый уточнённый и унифицированный каталог землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 гг., отражающий зоны повышенной сейсмичности в районе желобов Франц-Виктория и Св. Анны, о. Белый, архипелагов Новая Земля и Северная Земля и позволивший сформулировать рекомендации по изменению границ, значений максимально возможных магнитуд и глубин сейсмогенных слоёв доменов ЛДФ-моделей карт ОСР-97 и ОСР-2016 для данного региона.

Глава 5. Современная сейсмичность хребта Гаккеля

В главе представлены результаты многолетних стационарных сейсмических наблюдений за современной сейсмичностью срединно-океанического арктического хребта Гаккеля. Выявлены пространственно-временные особенности проявления слабой сейсмичности в пределах хребта, в том числе роевых последовательностей низкомagnitudeных землетрясений. Исследование было проведено с использованием совокупности технических решений, описанной в главе 2.

Землетрясения на срединно-океанических хребтах (СОХ) отражают активные магматические и тектонические процессы, формирующие новую океаническую кору. При этом, активные процессы спрединга ультрамедленных хребтов, со скоростями спрединга менее 20 $мм/год$ и к которым относятся хребет Гаккеля в

Северном Ледовитом океане и юго-западный Индийский в Индийском океане, ещё слабо изучены по сравнению с СОХ в Атлантическом и Тихом океанах, со скоростями спрединга более 25 мм/год. В течение всего инструментального периода землетрясения в пределах хребта Гаккеля регистрировались только удалёнными стационарными сейсмическими станциями. Однако, благодаря установке в XXI веке стационарных сейсмических станций на арктических архипелагах Земля Франца-Иосифа и Северная Земля появилась возможность регистрировать и изучать в пределах хребта Гаккеля низкомагнитудные группирующиеся землетрясения, в том числе роевые последовательности землетрясений [Рогожин и др., 2016а,б; Morozov et al., 2016, 2021].

Геодинамическая модель развития Арктического бассейна и примыкающих территорий, основанная на представлении о развитии верхнемантийной конвекции под континентом, обусловленной процессом субдукции Тихоокеанской литосферы под Евразийскую и Северо-Американскую литосферные плиты, отражена в работах [Лаверов и др., 2013; Лобковский и др., 2013; Лобковский и др., 2021]. Хребет Гаккеля возник в результате вклинивания в Арктику Срединно-Атлантического хребта, что привело к образованию глубоководного Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана. Хребет Гаккеля является самым молодым сегментом срединно-океанических хребтов и имеет кайнозойский возраст.

Обобщению информации о зарегистрированных в пределах срединно-океанического хребта Гаккеля землетрясениях ($m_b > 4$) за весь период инструментальных сейсмических наблюдений посвящены работы [Fujita et al., 1990; Аветисов, 1996; Engdahl et al., 1998; Engen et al., 2003; Schlindwein et al., 2015]. В статье [Schlindwein et al., 2015] были проанализированы все доступные данные о сейсмичности в пределах хребта Гаккеля и был сделан вывод, что для дальнейшего углубления нашего понимания процессов, протекающих в пределах хребта, необходимо получить сейсмические данные, которые ликвидируют разрыв в охвате магнитуд между очень локальными и краткосрочными исследованиями сейсмичности на льдинах и телесеизмическими записями. Также в статье отмечается, что необходимы долгосрочные наблюдения с использованием донных сейсмометров, которые исследуют очевидные различия в сейсмичности между западным вулканическим сегментом (ЗВС) хребта и центральным амагматическим сегментом (ЦАС), охватывающие также события с магнитудой от 2.0 до 4.0. В диссертационной работе показано, что благодаря установке стационарных сейсмических станций на арктических архипелагах Земля Франца-Иосифа и Северная Земля появилась возможность регистрировать и лоцировать землетрясения с хребта Гаккеля с представительными магнитудами от 2.5.

Для разных фрагментов хребта техническая возможность регистрировать низкомагнитудные землетрясения появилась в разное время, поэтому ниже приведены результаты сейсмического мониторинга, проводимого в пределах фрагмента хребта Гаккеля от 7° з.д. до 80° в.д. в период с 2012 по 2020 гг. и от 80° в.д. до 115° в.д. с декабря 2016 по 2020 гг. на основе данных сейсмических станций ZFI2, OMEGA и SVZ (код сети АН, DOI: <https://doi.org/10.7914/SN/АН>).

За период с 2012 по 2022 гг. в пределах хребта Гаккеля арктическими сейсмическими станциями сети АН было зарегистрировано 1225 землетрясений с

магнитудами ML от 2.0 до 5.2. Значения представительной магнитуды ML_C для всего хребта в целом рассчитывались двумя способами: методом MAXC (Maximum Curvature) [Wyss *et al.*, 1999] и методом GFT (Goodness-of-Fit test) [Wiemer, Wyss, 2000]. А также значения ML_C вычислялись отдельно для каждого сегмента – ЗВС, ЦАС и ВВС. Для ВВС значения ML_C вычислялись отдельно для разных временных периодов: с 2012 по 2016 гг. и с 2017 по 2022 гг. и для разных участков сегмента: от 30° в.д. до 62° в.д. и от 62° в.д. до 130° в.д. Результаты расчетов показали, что землетрясения регистрировались с представительными магнитудами от 2.5 до 3.3 в зависимости от участков и периода времени. На основе этих данных был составлен каталог представительных землетрясений хребта Гаккеля (Рис. 14).

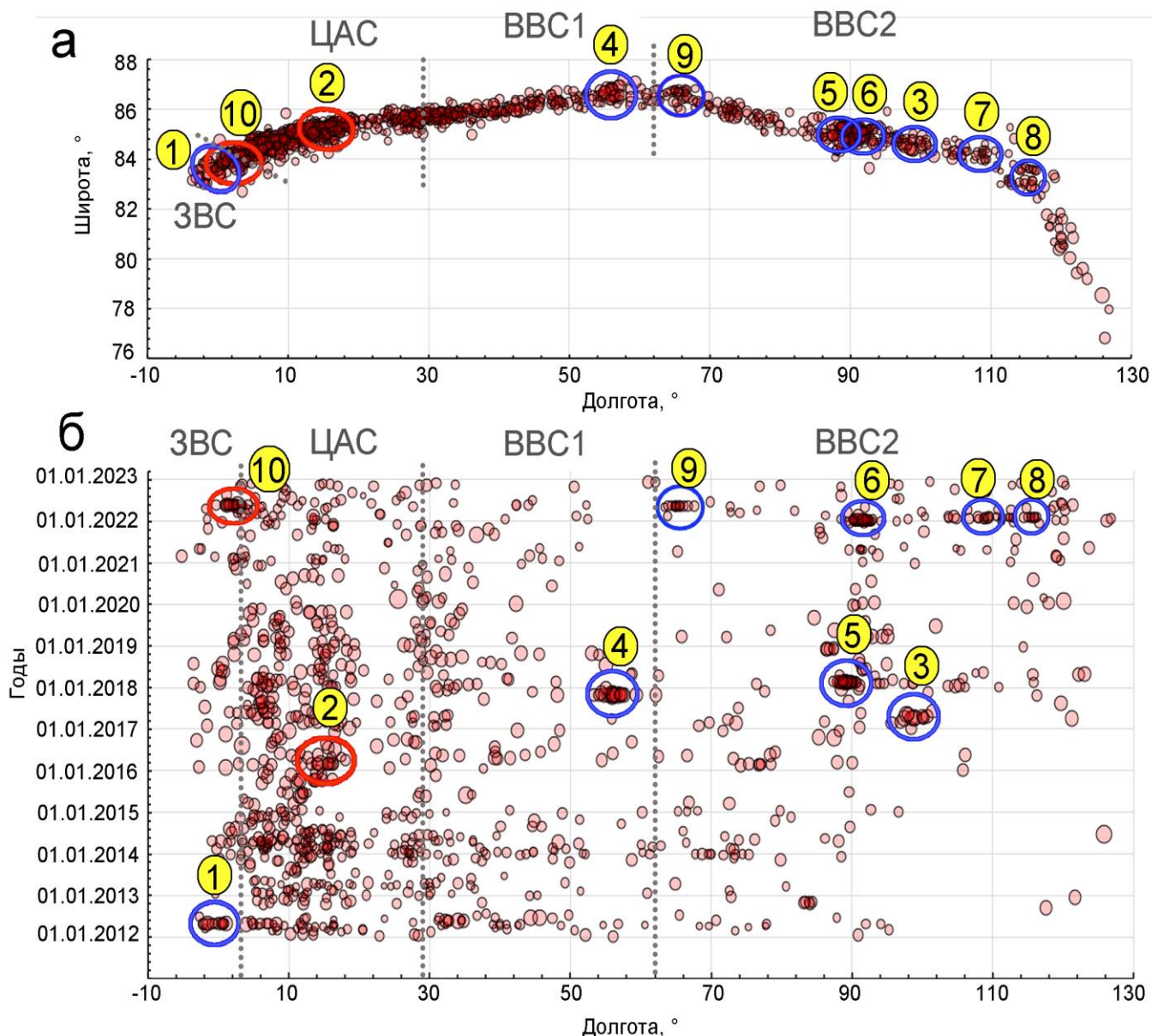


Рис. 14. Распределение представительных землетрясений хребта Гаккеля в пространстве и во времени:

а - распределение представительных землетрясений в пространстве; *б* - распределение представительных землетрясений во времени. Овалами синего цвета выделены рои землетрясений, овалами красного цвета – афтершоковые последовательности. Цифрами указаны номера групп землетрясений

Эпицентры землетрясений распределены вдоль хребта неравномерно в пространстве. Наибольшее число эпицентров приурочено к району хребта, ограниченному координатами от 1.5° в.д. до 19.0° в.д. Левая граница этого района практически совпадает с границей перехода зон ЗВС и ЦАС. Правая граница совпадает с расположением в ЦАС единственного вулканического центра. Далее вдоль хребта (до 26° в.д.) землетрясения регистрируется мало. И только восточнее 26° в.д. количество эпицентров, зарегистрированных землетрясений, начинает снова возрастать.

Приуроченность большинства землетрясений к сегменту ЦАС может быть объяснена тем, что спрединг этого сегмента амагматичен. В пределах сегмента толщина коры минимальна и температура мантии понижена. В структурообразовании этой части хребта преобладают тектонические, а не магматические и метаморфические процессы [Дубинин, 2013]. Однако, для сильных землетрясений (с $mb > 4.4$) за весь период наблюдений [Engen et al., 2003] приуроченность их эпицентров к району от 1.5° в.д. до 19.0° в.д. не выявляется. В пределах ЗВС землетрясений было зарегистрировано меньше, чем в ЦАС, а эпицентры их распределены неравномерно. Можно выделить район, ограниченный координатами от 5° з.д. до 3° з.д., к которому приурочена основная часть эпицентров.

С 2016 г. появилась техническая возможность регистрировать низкомагнитудные землетрясения для фрагмента хребта восточнее 80° в.д. Большинство зарегистрированных эпицентров землетрясений приурочено к району, ограниченному координатами от 86° в.д. до 96° в.д. В этой части хребта располагается только два вулканических центра: в районе 85° в.д., в котором произошло крупное извержение 1999 г [Müller, Jokat, 2000; Korger, 2013], и в районе 93° в.д.

Землетрясения в пределах хребта Гаккеля регистрировались неравномерно во времени (Рис. 14). В общем потоке сейсмических событий визуально можно наблюдать периоды активизации сейсмичности и периоды затиший по времени, а также скопления и группы событий, локализующиеся в определенном ареале пространства. В летние месяцы (с июля по сентябрь) уменьшение количества зарегистрированных землетрясений могло быть связано с сезонными вариациями чувствительности сейсмических станций на арктических архипелагах. Некоторые районы характеризуются отсутствием землетрясений в определённые периоды времени. Например, район с 48° в.д. по 63° в.д. в период с января 2019 по май 2022 г. Часть землетрясений формируют рои с практически одинаковыми диапазонами магнитуд, которые отражают активные процессы, протекающие в данное время и в данном месте.

Существует множество способов и приемов идентификации групповых (кластерных) землетрясений и разделения их на различные группы, относящиеся к афтершокам, форшокам, роям, и даже связанные с трассированием линейной трещиноватой структуры земной коры [Шебалин, 2005, Молчан, Дмитриева, 1991; Смирнов, 2009; Мирзоев, 1992; Frohlich, Davis, 1990]. Ограничением для применения стандартных методов в данном случае может служить тот фактор, что по исследуемой территории существующие каталоги могут быть

немногочисленными, неполными, и энергетический уровень некоторых роев землетрясений может быть ниже уровня представительной магнитуды. В настоящем же исследовании был применён алгоритм одиночных связей по [Frohlich, Davis, 1990].

Из общего каталога землетрясений, зарегистрированные в пределах хребта Гаккеля, были выделены 10 кластеров (групп) землетрясений, содержащих более чем восемь событий. Две из 10-ти групп были квалифицированы как афтершоковые последовательности, остальные восемь групп – как рои (Рис. 14). Один из восьми роев располагается в пределах ЗВС (западного вулканического сегмента), остальные – в ВВС (восточно-вулканическом сегменте). При этом в ЦАС (центральном амагматическом сегменте) роев землетрясений не зафиксировано, в этом сегменте хребта регистрируются преимущественно одиночные землетрясения и афтершоковые последовательности.

Районы, в которых в более ранних исследованиях были зарегистрированы рои по телесеismicким данным [Schlindwein, 2012], практически совпадают с районами, для которых выявлены низкомагнитудные рои в данном исследовании. Это может свидетельствовать о высокой интенсивности вулкано-тектонических процессов, протекающих в данных участках хребта. Район хребта в пределах координат $\sim 85^\circ$ – $\sim 93^\circ$ в.д. характеризуется самыми интенсивными проявлениями таких процессов.

Роевые последовательности, как по телесеismicким, так и по региональным данным выявлены также для участков хребта ($\sim 99^\circ$ в.д.; $\sim 107^\circ$ в.д.; $\sim 115^\circ$ в.д.), расположенных восточнее 93° в.д., где к настоящему моменту вулканических центров не выявлено. Это может свидетельствовать о наличии в этих районах возможных вулканических структур, которые к настоящему времени ещё не были выявлены по геолого-геофизическим и геоморфологическим данным в ходе комплексных экспедиций.

Напротив, для вулканических центров ($\sim 7^\circ$ з.д., $\sim 5^\circ$ з.д.; $\sim 2^\circ$ з.д., $\sim 19^\circ$ в.д., $\sim 31^\circ$ в.д., $\sim 34^\circ$ в.д., $\sim 39^\circ$ в.д. и $\sim 69^\circ$ в.д.), выявленных по геолого-геофизическим данным, не зарегистрированы роевые последовательности ни по телесеismicким, ни по региональным данным. Это может свидетельствовать об отсутствии или низкой интенсивности вулкано-тектонических процессов в данных вулканических центрах в настоящее время.

В районе вулканического центра $\sim 85^\circ$ в.д., в котором в 1999 г. произошёл мощный взрывной вулканизм на глубине около 4000 м, подтверждённый в ходе экспедиционных исследований, не выявлено современной роевой сейсмичности. Возможно, после события 1999 г. вулкано-тектонические процессы в данном районе заметно потеряли свою интенсивность и вулканический центр сейчас не активен.

Таким образом, пространственно-временные закономерности проявления современной слабой сейсмичности и роевых последовательностей хребта Гаккеля, выявленные на основе данных многолетних стационарных сейсмических наблюдений, характеризуют особенности проявления вулкано-тектонических процессов в пределах арктического ультрамедленного хребта.

Выводы главы 5

В течение всего инструментального периода землетрясения в пределах срединно-океанического ультрамедленного хребта Гаккеля регистрировались практически только удалёнными стационарными сейсмическими станциями. В XXI веке благодаря развитию инструментальных наблюдений на арктических архипелагах Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Северная Земля появилась возможность регистрировать низкомагнитудные землетрясения в пределах хребта на региональных расстояниях.

На основе данных многолетних стационарных наблюдений Архангельской сейсмической сети (код сети АН) и с применением предложенной совокупности технических решений выявлены пространственно-временные закономерности проявления современной слабой сейсмичности и роевых последовательностей в пределах хребта, характеризующие особенности проявления вулканотектонических процессов.

Глава 6. Сейсмичность севера Восточно-Европейской платформы

В главе представлены результаты создания единого уточненного каталога современных землетрясений приарктических территорий севера Восточно-Европейской платформы (ВЕП) за период с 2004 по 2018 гг. на основе объединения каталогов, бюллетеней и, частично, исходных данных всех региональных сейсмических сетей, функционирующих на севере ВЕП. Исследование было проведено с использованием совокупности технических решений, описанной в главе 2.

Территория севера ВЕП из-за исторических, а затем и экономических причин не была обеспечена систематическими и целенаправленными наблюдениями за сейсмическими процессами. Долгое время преобладали представления об асейсмичности платформенных территорий, что также не способствовало развитию сейсмометрических наблюдений на ВЕП. Поэтому Г.Д. Панасенко, внесший весомый вклад в развитие сейсмологических исследований на северо-западе России, предложил выделить в истории сейсмологических исследований Северной Европы особую «макросейсмическую» стадию, длившуюся до середины XX века. На этой стадии основным источником сведений для пополнения базы знаний о сейсмичности региона была описательная информация, поступавшая от населения [*Панасенко, 1969; Виноградов и др., 2012*].

При этом информация о тектонических землетрясениях на ВЕП всегда привлекает большое внимание исследователей. Во-первых, платформа характеризуется относительно слабой сейсмической активностью, и каждое землетрясение в силу своей уникальности становится объектом тщательного изучения. Во-вторых, до недавнего времени основными источниками знаний о сейсмичности платформы были письменные свидетельства за исторический период. В-третьих, высокий уровень урбанизации, наличие ответственных и экологически опасных объектов, крупных промышленных центров вызывают необходимость более внимательно отслеживать любые проявления сейсмических процессов на платформенных территориях.

Начиная с 2004 г., территория севера ВЕП имеет наибольшую плотность сейсмометрических наблюдений за весь инструментальный период. Это создало условия для определения параметров гипоцентров современных землетрясений, в том числе низкомагнитудных, на основе данных сейсмических станций, расположенных в широком азимутальном створе и диапазоне эпицентральных расстояний. Однако региональные сейсмические сети на севере ВЕП развивались и функционировали независимо друг от друга. В результате параметры очагов сейсмических событий, зарегистрированных на севере ВЕП и в Беломорском регионе, в частности, отличались в разных сейсмологических Центрах, т.к. были основаны, чаще всего, на анализе данных лишь собственных станций. Поэтому в рамках данного исследования усилия были направлены на объединение каталогов, бюллетеней и, частично, исходных данных всех региональных сейсмических сетей, функционирующих на севере ВЕП. Это позволило создать для землетрясений, зарегистрированных на севере ВЕП за период с 2005 по 2018 гг., сводные бюллетени и на их основе произвести перерасчет параметров гипоцентров с использованием единой скоростной модели и единого алгоритма расчета.

На момент 2020 г. инструментальные наблюдения на севере ВЕП осуществляются на базе Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова УрО РАН (код сети АН), Кольского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (код сети KOGSR), Института геологии Карельского научного Центра РАН, Института геологии Коми научного Центра РАН, Центрального отделения Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (код сети OBGSR), Института сейсмологии Университета Хельсинки (Финляндия, код сети HE), Геофизической обсерватории Соданкюля Университета г. Оулу (Финляндия, код сети FN), агентства NORSAR (Норвегия, код сети NO), Норвежской национальной сейсмической сети (Университет г. Бергена, Норвегия, код сети NS).

На основе объединения данных Института сейсмологии Университета Хельсинки (Финляндия) (код сети HE), ISC и российских региональных сейсмических сетей, был составлен предварительный каталог землетрясений для севера ВЕП за период с 2005 по 2018 гг. В предварительном каталоге содержатся землетрясения, зарегистрированные не менее 4-я сейсмическими станциями. При этом отдельными сейсмическими станциями региональных сетей регистрируется много слабых сейсмических событий тектонической природы, некоторые из которых образуют рои [Ассиновская, 2018; Ассиновская, Карпинский, 2020]. Но эти события не попали в предварительный каталог из-за принятых условий по минимальному количеству сейсмических станций.

Для каждого землетрясения из предварительного каталога была проведена проверка его тектонической природы на основе критериев, разработанных сотрудниками Кольского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» [Asming, Kremenetskaya, 2002; Kremenetskaya et al., 2002; Ringdal et al., 2002] и на основе анализе данных инфразвуковой группы «Апатиты» [Кольский Филиал..., 2020]. Однако для части сейсмических событий либо не удалось провести дополнительную проверку, в основном, из-за низкого

соотношения сигнал/шум на записи сейсмической станции, либо однозначно подтвердить или опровергнуть тектоническую природу не удалось. Поэтому не исключается возможность попадания в каталог сейсмических событий техногенной природы. При этом соискатель исходит из предположения, что свел к минимуму такую возможность. И если события и присутствуют в каталоге, то они не должны существенно повлиять на определение основных закономерностей распределения современной сейсмичности на севере ВЕП.

В период с 2005 по 2018 гг. в районе исследований было зарегистрировано 125 землетрясений с магнитудой $M_L(HE)$ от 0.1 до 3.0 (Рис. 15). При этом только 15 землетрясений имели M_L выше 2.0. Представительными в каталоге являются землетрясения, начиная с магнитуды 1.3 (Рис. 16). Но, это относится не ко всему району исследования, а, преимущественно, к его северо-западной части, где зарегистрировано большинство землетрясений. Распределение эпицентров зарегистрированных землетрясений вполне соответствует закономерностям, выявленным ранее в работах [Панасенко, 1980; Ассиновская, 2004; Годзиковская, 2010; Никонов, 2013; Виноградов и др., 2016].

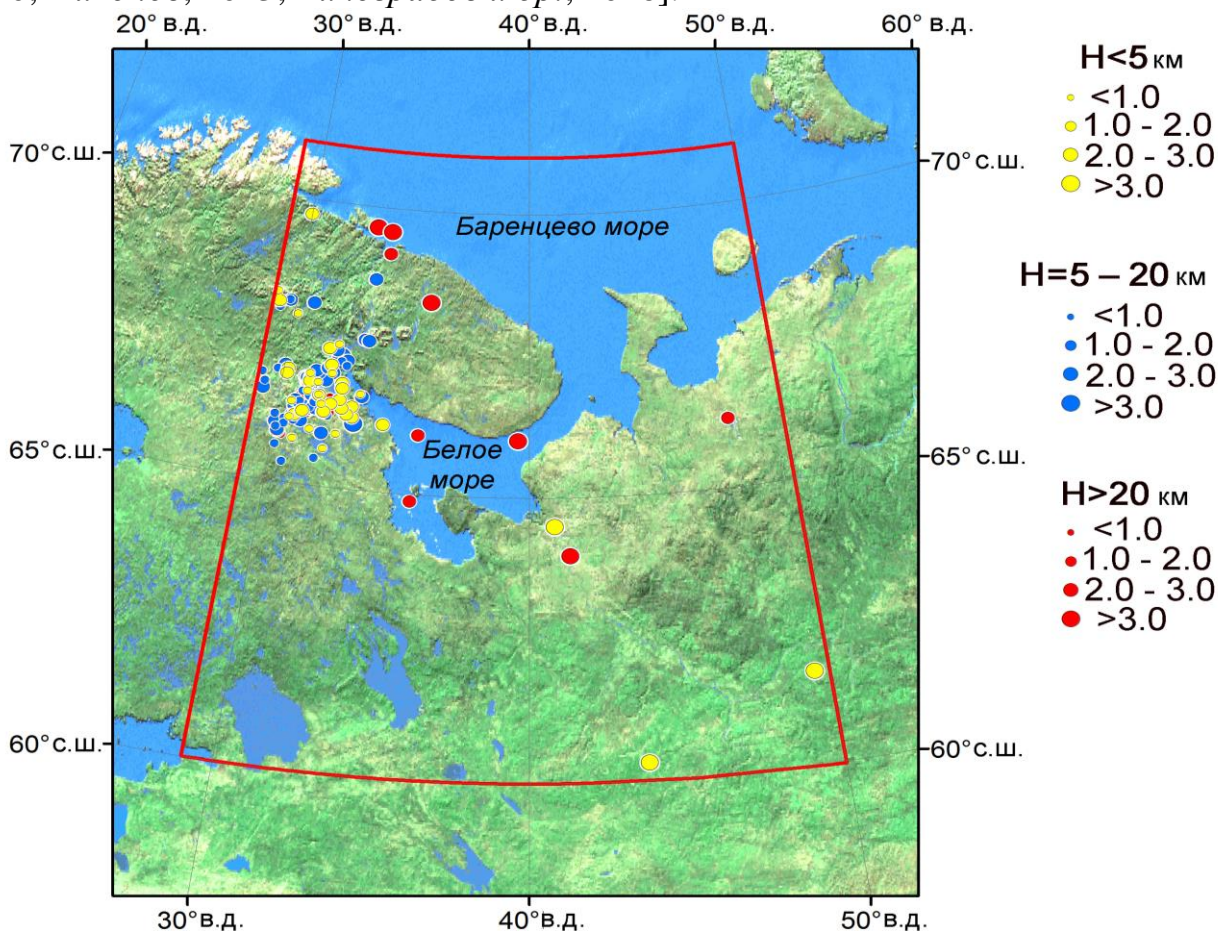


Рис. 15. Карта эпицентров землетрясений из уточненного каталога за период с 2005 по 2019 гг. с указанием магнитуды и глубины.

Линия ограничивает изучаемую область

Северо-запад ВЕП характеризуется одной самой высокой сейсмической активностью, а именно повышенная сейсмическая активность характерна для западной части Беломорского бассейна и слабая активность восточной и

центральной частей. Эпицентры приурочены к Кандалакшской и Куусамо-Порьегубской сейсмогенерирующим зонам, идентифицированным ранее по инструментальным данным [Баранов и др., 2007].

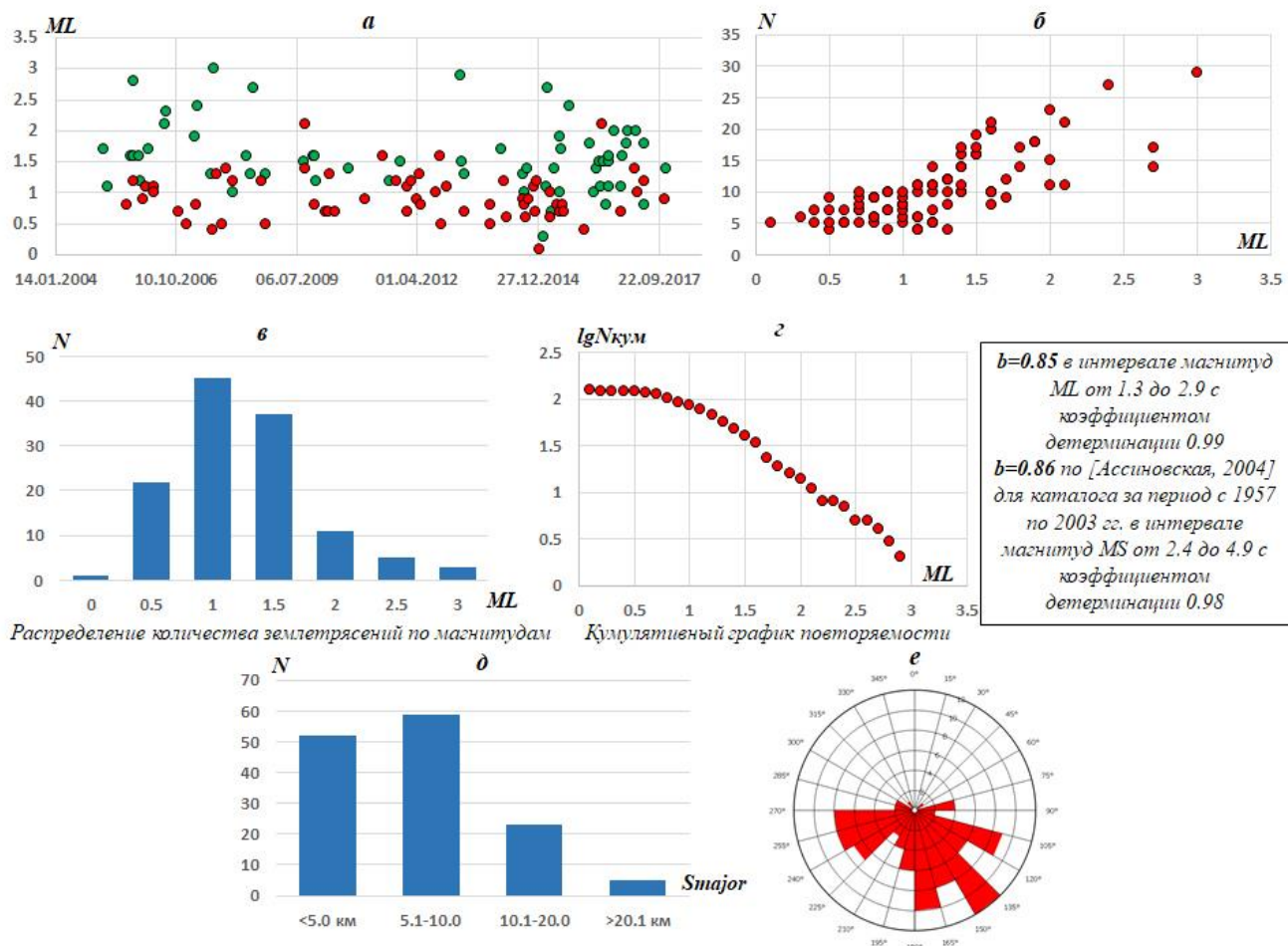


Рис. 16. Анализ данных каталога землетрясений:

а – распределение магнитуд землетрясений по времени: зелеными кружками указаны эпицентры, для которых подтверждена тектоническая природы; красными – эпицентры, для которых не удалось применить критерии распознавания из-за низкого соотношений «сигнал/шум»; *б* – распределение количества сейсмических станций, зарегистрировавших землетрясения, в зависимости от магнитуды; *в* – распределение количества землетрясений по магнитудам; *г* – кумулятивный график повторяемости; *д* – Распределение количества землетрясений от значений радиуса большой полуоси эллипса ошибок; *е* – распределение значений зоны тени при локации землетрясений

В восточной части Беломорского региона зарегистрировано два землетрясения в Беломорско-Двинском районе в 2005 и 2013 гг. и одно – в районе пролива Горло в 2006 г. Все землетрясения имеют магнитуду $ML(HE)$ больше 2.0, что выделяет их среди остальных землетрясений. Факт возникновения землетрясения 2005 г., если его рассматривать совместно со сведениями о землетрясениях 1847 и 1935 гг. [Никонов, 2013], может указывать на сейсмическую активность Беломорско-Двинского района. Эпицентры можно соотнести с системой крупных разломов, разграничивающих Архангельский выступ и Керецко-Пинежский рифт на северо-востоке и Онежско-Кандалакшский палеорифт на юго-западе. Вычисленный фокальный механизм землетрясения 2013 г. соотносится с выводами работы

[Сим и др., 2011] о характерном для восточной части Балтийского щита региональном субмеридиональном сжатии и субширотном растяжении.

Эпицентр землетрясения 2006 г. в проливе Горло практически совпадает с эпицентром исторического землетрясения 1912 г. [Никонов, 2000]. Как видно, разрядка тектонических напряжений происходит и на поперечно-секущих (северо-восточных) разломных зонах. В центральной части Беломорского региона слабые землетрясения за последние десять лет не зарегистрированы, как и за весь инструментальный период [Ассиновская, 2004].

Землетрясения на севере ВЕП обычно происходят в пределах земной коры. Для землетрясений в Беломорском регионе характерны значения глубин очагов от 1 до 20 км. Это хорошо согласуется с результатами [Bungum, Lindholm, 1997; Ассиновская, 2004], которые пришли к выводу, что слой, вызывающий землетрясения, находится в пределах от 5 до 17 км глубины. Для некоторых землетрясений, эпицентры которых расположены непосредственно в акватории Белого моря, в Карелии и севере Кольского полуострова значения глубины очага составляют 20 км и ниже. Гипоцентры на востоке ВЕП и на севере Урала находятся на глубинах от 5 до 20 км.

Дополнительно проведено уточнение параметров гипоцентров землетрясений, зарегистрированных на севере Русской плиты за инструментальный период наблюдений. Уточнённые эпицентры большинства землетрясений сместились на десятки километров от исходного положения. Впервые в каталог землетрясений для севера Русской плиты включены два землетрясения 19.07.1982 г. и 07.10.2012 г., которые ранее не фигурировали в сейсмических каталогах по Европейскому Северу. Наоборот, для землетрясения 7 августа 1975 г. ставится под сомнение приуроченность его эпицентра к северу Русской плиты.

Результаты, полученные в этой главе, позволяют уточнить наши представления о проявлении сейсмичности на севере ВЕП. Полученные каталоги с переуточнёнными параметрами землетрясений могут служить основой для последующих исследований, связанных с построением геодинамических моделей, исследованием напряженно-деформированного состояния земной коры и оценки сейсмической опасности территории.

Выводы главы 6

Начиная с 2004 г., приарктические территории севера Восточно-Европейской платформы имеют наибольшую плотность сейсмометрических наблюдений за весь инструментальный период. Это создало условия для определения параметров гипоцентров современных землетрясений, в том числе низкомагнитудных, на основе данных сейсмических станций, расположенных в широком азимутальном створе и диапазоне эпицентральных расстояний.

С применением совокупности технических решений, описанной в главе 2, и на основе бюллетеней, частично, исходных данных всех региональных сейсмических сетей, функционирующих на севере платформы, создан единый уточнённый каталог современных землетрясений приарктических территорий севера Восточно-Европейской платформы за период с 2004 по 2018 гг. Также проведено уточнение параметров очагов землетрясений, зарегистрированных за весь инструментальный

период на севере Русской плиты, позволило исключить землетрясения, не относящиеся к данному региону и, наоборот, включить ранее не фигурировавшие в сейсмических каталогах по Европейскому Северу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Заключении приводятся основные выводы по результатам диссертационной работы и рассматриваются перспективы по их возможному применению. Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Создана совокупность технических решений, направленная на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений западного сектора Российской Арктики, включающая в себя: новые и апробированные региональные одномерные скоростные модели; комбинированную модель, состоящую из 11 региональных моделей; уточненную шкалу локальной магнитуды *ML* и корреляционные связи между магнитудами разных типов, вычисленными в различных сейсмологических центрах; новый метод вероятностной локации раннеинструментальных землетрясений; применение современного алгоритма локации; сводный электронный архив бюллетеней сейсмических станций первой половины XX века и интеграция цифровых данных сейсмических станций, функционирующих в XXI веке, из общедоступных источников.

2. Обобщены сведения о землетрясениях Арктики, произошедшие в начале XX века, и проведено уточнение параметров их очагов. Создан уточнённый каталог землетрясений с параметрами очагов для большей части рассмотренных землетрясений, существенно отличными от первоначальных, указанных в различных источниках, что может оказать влияние на итоговую оценку сейсмической опасности некоторых арктических территорий, в частности, архипелагов Северная Земля и Земля Франца-Иосифа. Выявлены «забытые» землетрясения, которые встречаются только в научных статьях исследователей начала XX века и не упоминаются в более поздних работах и каталогах.

3. Создан новый уточнённый и унифицированный каталог землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 гг., что позволило выявить сейсмоактивные зоны в районе желобов Франц-Виктория и Св. Анны, о. Белый, архипелагов Новая Земля и Северная Земля и оценить для них параметры сейсмического режима, а также предложить рекомендации по изменению границ, значений максимально возможных магнитуд и глубин сейсмогенных слоёв доменов ЛДФ-моделей карт ОСР-97 и -2016 для данного региона. Созданный каталог включает в себя данные о современной сейсмичности районов, ранее недоступных для детального сейсмического мониторинга, что позволило уточнить пространственное распределение землетрясений в регионе и оценить некоторые параметры сейсмического режима.

4. Впервые по данным многолетних стационарных сейсмических наблюдений выявлены пространственно-временные особенности проявления слабой сейсмичности и роевых последовательностей срединно-океанического хребта Гаккеля, одной из главных сейсмоактивных зон в Арктике. Было показано, что современная слабая сейсмичность хребта Гаккеля проявляется неравномерно в пространстве и во времени. Наибольшее число эпицентров приурочено к

Центральному амагматическому сегменту. Рои землетрясений тяготеют к некоторым вулканическим центрам, выявленным ранее по геолого-геофизическим данным в ходе комплексных экспедиций. Пространственное распределение роёв может также свидетельствовать о наличии возможных вулканических структур, которые к настоящему времени ещё не были выявлены по геолого-геофизическим и геоморфологическим данным.

5. Создан уточненный каталог современных землетрясений приарктических территорий севера Восточно-Европейской платформы на основе объединения каталогов, бюллетеней и, частично, исходных данных всех региональных сейсмических сетей, функционирующих на севере платформы. Выявлены пространственно-временные и энергетические особенности проявления современной сейсмичности севера платформы.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы определяется получением новых знаний, имеющих отношение к фундаментальным областям сейсмологии и возможностью их применения при оценке сейсмической опасности арктических и прилегающих к ним территорий, параметров их сейсмического режима, а также при обеспечении безопасности проектируемых и строящихся объектов различного назначения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

основных результатов диссертации в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, Scopus и RSCI (в обратном хронологическом порядке)

1. **Морозов А.Н.**, Асминг В.Э., Ваганова Н.В., Евтюгина З.А. Вероятностная локация раннеинструментальных землетрясений на основе макросейсмических и инструментальных данных // Физика Земли – 2024. – № 1 – С 175-185.
Переводная версия:
Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Evtyugina Z.A. Probabilistic location of early instrumental earthquakes based on macroseismic and instrumental data // Izvestiya, Physics of the Solid Earth – 2024 – (in print).
2. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Михайлова Я.А., Морозова Е.Р., Старков И.В. Рои землетрясений как свидетельство вулкано-тектонических процессов на ультрамедленном спрединговом хребте Гаккеля в Арктике // Геодинамика и тектонофизика – 2024. – (в печати).
Переводная версия:
Morozov A.N., Vaganova N.V., Mikhailova Y.A., Morozova E.R., Starkov I.V. Earthquake swarms as evidence of volcano-tectonic processes on the ultraslow spreading Gakkell Ridge in the Arctic // Geodynamics & Tectonophysics. – 2024 – (in print).
3. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Алёшин И.М. Сейсмическая изученность западного сектора Российской Арктики // Геофизические процессы и биосфера – 2023. – Т. 22 – № 4 – С. 1-14.
Переводная версия:
Morozov A.N., Vaganova N.V., Aleshin I.M. Seismic study of the western sector of the Russian Arctic // Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics – 2023. – (in print).
4. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Старков И.В., Михайлова Я.А. Современная группирующаяся низкомагнитудная сейсмичность срединно-океанического хребта Гаккеля // Russian Journal of Earth Sciences. – 2023. – №. 23 – ES3007. DOI: <https://doi.org/10.2205/2023es000843>

5. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Перетокин С.А., Алёшин И.М. Сейсмичность западного сектора Российской Арктики // Физика Земли – 2023. – № 2. – С. 115-148.
Переводная версия:
Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Peretokin S.A., Aleshin I.M. Seismicity of the Western Sector of the Russian Arctic // Izvestiya, Physics of the Solid Earth – 2023 – V. 59 – № 2 – P. 209-241. DOI: 10.1134/S106935132302009X
6. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Михайлова Я.А., Старков И.В. Унификация магнитуд современных землетрясений Евразийской Арктики // Сейсмические приборы. – 2022. – Т. 58. – №1. – С. 67-80.
Переводная версия:
Morozov A.N., Vaganova N.V., Mikhailova Ya.A., Starkov I.V. Unification of Magnitudes for Modern Earthquakes in the Eurasian Arctic Region // Seismic Instruments. – 2022. – V. 58. – №. 4. – P. 389-397. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0747923922040077>
7. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Балуев А.С., Асминг С.В. Сейсмичность Беломорского региона // Сейсмические приборы. – 2022. – Т. 58. – № 1. – С. 5-28.
Переводная версия:
Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Baluev A.S., Asming S.V. Seismicity of the White Sea Region // Seismic Instruments. – 2022. – V. 58. – №. 3. – P. 311-329. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0747923922030112>
8. Антоновская Г.Н., Конечная Я.В., Ваганова Н.В., Басакина И.М., **Морозов А.Н.**, Шахова Е.В., Михайлова Я.А., Данилов К.Б. Вклад уникальной научной установки «Архангельская сейсмическая сеть» в изучение сейсмичности Российской Арктики // Геодинамика и тектонофизика – 2022. – Т. 13. – № 2. – С. 1-8.
Переводная версия:
Antonovskaya G.N., Konechnaya Y.V., Vaganova N.V., Basakina I.M., Morozov A.N., Shakhova E.V., Mikhailova Y.A., Danilov K.B. Contribution of the unique scientific facilities "Arkhangelsk Seismic Network" to the Russian Arctic seismicity study // Geodynamics & Tectonophysics. – 2022 – V. 13 – № 2 – P. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0587>
9. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Кременецкая Е.О. Уточнение параметров очагов раннеинструментальных землетрясений Арктики // Сейсмические приборы. – 2021. – Т. 57. – № 4. – С. 5-20.
Переводная версия:
Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Kremenetskaya E.O. Relocation of Early Instrumental Earthquakes in the Arctic // Seismic Instruments – 2022. – V. 58. – № 1. – P. 32-44. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0747923922010066>
10. **Morozov A.N.**, Vaganova N.V., Konechnaya Y.V., Asming V.E., Dulentsova L.G., Evtyugina Z.A. Seismicity in the far Arctic areas: Severnaya Zemlya and the Taimyr Peninsula // Journal of Seismology. – 2021. – V. 25. – P. 1171-1188. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10032-1>
11. **Morozov A.N.**, Vaganova N.V., Antonovskaya G.N., Asming V.E., Gabsatarova I.P., Dyagilev R.A., Shakhova E.V., Evtyugina Z.A. Low-Magnitude Earthquakes at the Eastern Ultraslow-Spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean // Seismological Research Letters. – 2021. – V. 92. – № 4. – P. 2221–2233. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220200308>
12. Antonovskaya G.N., Basakina I.M., Vaganova N.V., Kapustian N.K., Konechnaya, Y.V., **Morozov A.N.** Spatio-temporal relationship between Arctic mid-ocean ridge system and intraplate seismicity of the European Arctic // Seismological Research Letters. – 2021. – V. 92 – P. 2876-2890 DOI: <https://doi.org/10.1785/0220210024>
13. **Morozov A.N.**, Vaganova N.V., Dulentsova L.G., Asming V.E., Evtyugina Z.A. The 1927 earthquakes and aftershocks in the Crimea: relocation based on instrumental data // Journal of Seismology. – 2021. – V. 25. – P. 393-417. DOI: 10.1007/s10950-020-09972-x
14. **Morozov A.N.**, Vaganova N.V., Konechnaya Y.V., Zueva I.A., Asming V.E., Noskova N.N., Sharov N.V., Assinovskaya B.A., Panas N.M., Evtyugina Z.A. Recent seismicity in northern

- European Russia // Journal of Seismology. – 2020. – V. 24. – №. 1. – P. 37-53. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09883-6>
15. Noskova N.N., **Morozov A.N.**, Vaganova N.V. The 9 November 2002 Earthquake in the Northeast of the Russian Plate (Komi Republic) // Russian Geology and Geophysics – 2020. – V. 61. – №. 9. – P. 1056-1064. DOI: 10.15372/RGG2019165
 16. **Morozov A.N.**, Vaganova N.V., Shakhova E.V., Konechnaya Y.V., Asming V.E., Antonovskaya G.N., Evtyugina Z.A. Seismicity of the Arctic in the Early Twentieth Century: Relocation of the 1904–1920 Earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2019. – V. 109. – №. 5. – P. 2000-2008. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120190018>
 17. **Morozov A.N.**, Vaganova N.V., Konechnaya Y.V. The October 14, 1908 MW 6.6 earthquake in the Barents and Kara sea region of the Arctic: Relocation based on instrumental data // Polar Science. – 2019. – V. 20. – P. 160-166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.05.001>
 18. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Никонов А.А., Шаров Н.В., Конечная Я.В., Михайлова Я.А., Евтюгина З.А. Современная сейсмичность Беломорского региона // Вулканология и сейсмология. – 2019. – №. 1. – С. 36-51.
Переводная версия:
Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Nikonov A.A., Sharov N.V., Konechnaya Y.V., Mikhailova Ya.A., Evtyukhina Z.A. The Present-Day Seismicity of the White Sea Region. // Journal of Volcanology and Seismology. – 2019. – V. 13 – P. 27–41. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0742046319010068>
 19. **Morozov A.N.**, Vaganova N.V., Asming V.E., Konechnaya Y.V., Evtyugina Z.A. The instrumental seismicity of the Barents and Kara sea region: relocated event catalog from early twentieth century to 1989 // Journal of Seismology. – 2018. – V. 22. – №. 5. – P. 1171-1209. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9760-y>
 20. **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.
Переводная версия:
Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Mikhailova Ya.A. Seismicity of the North of the Russian Plate: Relocation of Recent Earthquakes // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2018. – V. 54. – №. 2. – P. 292-309. DOI: 10.1134/S1069351318020143
 21. **Morozov A.N.**, Asming V.E., Vaganova N.V., Konechnaya Y.V., Mikhaylova Y.A., Evtyugina Z.A. Seismicity of the Novaya Zemlya archipelago: relocated event catalog from 1974 to 2014 // Journal of Seismology. – 2017. – V. 21. – №. 6. – P. 1439-1466. DOI: 10.1007/s10950-017-9676-y
 22. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В. Годографы региональных волн Р и S для районов спрединговых хребтов Евро-Арктического региона // Вулканология и сейсмология. – 2017. – №. 2. – С. 59-67.
Переводная версия:
Morozov A.N., Vaganova N.V. The travel times of regional P and S for spreading ridges in the European Arctic // Journal of Volcanology and Seismology. – 2017. – V. 11. – №. 2. – P. 156-163. DOI: 10.1134/S0742046317020051
 23. **Morozov A.N.**, Vaganova N.V., Ivanova E.V., Konechnaya Y.V., Fedorenko I. V., Mikhaylova Y.A. New data about small-magnitude earthquakes of the ultraslow-spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean // Journal of Geodynamics. – 2016. – V. 93. – P. 31-41. DOI: 10.1016/j.jog.2015.11.002
 24. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Конечная Я.В., Тектонические землетрясения 22.10.2005 и 28.03.2013 гг. на севере Русской плиты // Физика Земли. – 2016. – №. 4. – С. 52-52.
Переводная версия:
Morozov A.N., Vaganova N.V., Konechnaya Y.V. Tectonic earthquakes of October 22, 2005 and March 28, 2013 in the north of the Russian plate // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2016. – V. 52. – №. 4. – P. 520-533. DOI: 10.1134/S1069351316030095

25. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Беленович Т.Я., **Морозов А.Н.** Современная геодинамика хребта Гаккеля по сейсмологическим данным // Арктика: экология и экономика – 2016. – № 4(24). – С. 58-71.
26. **Morozov A.N.**, Vaganova N.V., Konechnaya Y.V., Asming V.E. New data about seismicity and crustal velocity structure of the “continent-ocean” transition zone of the Barents-Kara region in the Arctic // Journal of Seismology. – 2015. – V. 19. – №. 1. – P. 219-230. DOI: 10.1007/s10950-014-9462-z
27. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Конечная Я.В. Сейсмичность северной акватории Баренцева моря в районе трогов Франц-Виктория и Орла // Геотектоника. – 2014. – №. 3. – С. 78-84.
Переводная версия:
Morozov A.N., Vaganova N.V., Konechnaya Y.V. Seismicity of the northern Barents Sea in area of the Franz Victoria and Orla troughs // Geotectonics. – 2014. – V. 48. – №. 3. – P. 232-238. DOI: 10.1134/S0016852114030042
28. **Morozov A.N.**, Konechnaya Y.V. Monitoring of the Arctic region: contribution of the Arkhangelsk seismic network // Journal of seismology. – 2013. – V. 17. – №. 2. – P. 819-827. DOI: 10.1007/s10950-012-9356-x

Публикации в других изданиях из списка РИНЦ

1. **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. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.06>
2. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В. Годографы сейсмических волн для Севера Русской плиты по данным Архангельской сейсмической сети // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 12. – С. 48-51.
3. **Морозов А.Н.** Метод идентификации взрывной сейсмичности на территории Архангельской области // Вестник Камчатской региональной ассоциации "Учебно-научный центр". Серия: Науки о Земле. – 2008. – № 1(11). – С. 177-184.

Монография

1. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В. Сейсмичность западного сектора Российской Арктики – Москва: Наука, 2024. – 234 с. – (в печати).

Учебно-методическое пособие

1. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В. Руководство по обработке локальных и региональных землетрясений в Евразийской Арктике. – Архангельск: ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, 2022 – 65 с. ISBN 978-5-600-03447-1

Главы в коллективных монографиях

1. **Морозов А.Н.**, Федоров А.В., Ваганова Н.В., Виноградов А.Н., Асминг В.Э. Сейсмичность Беломорья // Строение и динамика Беломорья / отв. ред. Н.В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022 – С. 143-164. ISBN 978-5-9274-0914-3
2. Antonovskaya G., **Morozov A.**, Vaganova N., Konechnaya Y. Seismic monitoring of the European Arctic and Adjoining Regions // The Arctic. Current Issues and Challenges. – 2020. – P. 303-368. ISBN: 978-1-53617-306-2
3. **Морозов А.Н.** Сейсмологические исследования на архипелаге Шпицберген // Комплексная научно-образовательная экспедиция «Арктический плавучий университет – 2013»: материалы экспедиции: в 2 ч. / отв. ред. К.Г. Боголицын; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. – Архангельск: ИПЦ САФУ, 2013. – Ч. 1. – С. 123-147. ISBN 978-5-261-00864-4

4. **Морозов А.Н.** Сейсмическая обстановка в западном секторе Арктики // Комплексная научно-образовательная экспедиция «Арктический плавучий университет – 2012»: материалы экспедиции: 2 ч. / отв. ред. К.Г. Боголицын; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. – Архангельск: ИПЦ САФУ, 2012. – Ч. 1. – С. 150-199. ISBN: 978-5-7536-0383-8
5. Французова В.И., **Морозов А.Н.**, Николаев А.В. Сейсмический эффект техногенных событий и катастроф Архангельской области // Сейсмологические исследования в Арктических и приарктических регионах. Под ред. Чл.-корр. РАН Ф.Н. Юдахина. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – С. 50-64. ISBN 978-5-7691-2185-2

Список зарегистрированных программ для ЭВМ и баз данных

1. Асминг В.Э., **Морозов А.Н.** ProLom. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617379 от 07 апреля 2023 г.
2. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В. Сводный уточнённый и унифицированный каталог землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 гг. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023620419 от 31 января 2023 г.
3. **Morozov A.**, Vaganova N. Earthquake catalog of the Gakkel mid-ocean ridge (Arctic Ocean) according to the data of the Arkhangelsk seismic network (АН code) for the period from 2013 to 2022 // ISC Seismological Dataset Repository. – 2023. DOI: 10.31905/SMUPNWER
4. Алёшин И.М., **Морозов А.Н.** Программа расчёта пространственного распределения региональной сейсмической активности. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663077 от 11 июля 2022 г.

Подписано в печать __.__.2023 г.

Формат 64×84/16. Объем 2,0 усл. печ. л.

Тираж 150 шт. Заказ № _____

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН

123242 г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1.

Тел. / факс: (499) 254-90-88. E-mail: serg@tigra-press.ru