

*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 – 2024

**Работа выполнена** в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук.

**Научный консультант:** **Маловичко Алексей Александрович**, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, научный руководитель Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук».

**Официальные оппоненты:** **Лобковский Леопольд Исаевич**, академик РАН, доктор физико-математических наук, научный руководитель Геологического направления, руководитель лаборатории геодинамики, георесурсов, георисков и геоэкологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук.

**Гриб Николай Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Горное дело» Технического института (филиала) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» в г. Нерюнгри.

**Дзедобов Борис Аркадьевич**, доктор физико-математических наук, заместитель директора по науке, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией геофизических данных Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизического центра Российской академии наук.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук.

Защита диссертации состоится **23 мая 2024 г. в 14 часов** на заседании Диссертационного совета 24.1.132.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

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

Автореферат разослан «\_\_\_» марта 2024 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экз. направлять по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, уч. секретарю дис. совета Р.А. Жосткову.

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 проходило неравномерно как во времени, так и в пространстве. Особенности развития инструментальных наблюдений напрямую влияли на сейсмологическую изученность арктических территорий [Hodgson, 1965; Панасенко, 1986; Ассиновская, 1994; Аветисов, 1996; Schlindwein et al., 2015].

В основе исследований по оценке сейсмической опасности территории лежит каталог землетрясений, по данным которого вычисляются параметры сейсмического режима. Для Арктического региона информация об исторических и палеоземлетрясениях практически недоступна, поэтому большую роль играет достоверность вычисленных параметров землетрясений, зарегистрированных за весь инструментальный период. Однако, в течение всего XX в. вычисление основных параметров землетрясений происходило преимущественно на основе данных не всех функционировавших в регионе сейсмических станций, с применением устаревших в настоящее время скоростных моделей и алгоритмов локации. Землетрясения оценивались магнитудами разных типов, вычисленными в разных международных и региональных сейсмологических центрах. Для части землетрясений отсутствовали значения магнитуд. Это приводит к сложностям при сопоставлении данных о землетрясениях за разные периоды времени и для разных арктических территорий.

С начала XXI в. 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 [Ottemöller et al., 2018; Маловичко, 2010; Виноградов и др., 2012; Schweitzer et al., 2021; Антоновская и др., 2022].

Однако, как и в XX в., сейсмические станции принадлежат разным международным и региональным сейсмическим сетям. Вычисленные в разных сейсмологических центрах основные параметры арктических землетрясений отличаются, т.к. основаны, чаще всего, на анализе данных лишь станций конкретной сети, собственных (глобальных и 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. Поэтому низкомагнитудные землетрясения, зарегистрированные за пределами района ответственности, не отражаются в каталогах регионального центра.

На основе геолого-геофизических исследований в западном секторе Российской Арктики открыты такие крупные нефтегазовые месторождения как Штокмановское, Ледовое, Лудловское, Приразломное на Баренцевом шельфе и

Русановское, Ленинградское на Карском шельфе [Ivanova et al., 2006]. В настоящее время в рамках реализации проектов по освоению месторождений в Российской Арктике ведется проектирование и строительство промышленных систем и объектов.

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 основных параметров (гипоцентр, магнитуда) землетрясений, зарегистрированных за весь период инструментальных наблюдений. Такие исследования необходимо проводить с применением новых и современных алгоритмов локации, апробированных региональных скоростных моделей, уточненной шкалы локальной магнитуды, 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 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. Разработать совокупность решений, направленную на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений первой половины XX в. и современных землетрясений западного сектора Российской Арктики.

2. Обобщить сведения о зарегистрированных за первые десятилетия XX в. сильных арктических землетрясениях 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, в том числе срединно-океанического хребта Гаккеля, 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 исходные данные отечественных и зарубежных сейсмических

станций, функционировавших в Арктике с начала XX в. 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 ЕГС РАН;

- архив Геофизического центра РАН;

- фонд Российской государственной библиотеки;

- архив ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН;

- личный архив Й. Швейцером (J. Schweitzer) из Университета г. Осло [Schweitzer, Lee, 2003];

- Сводные бюллетени: сборники «Shide Circulars» (1899–1912 гг.); бюллетени ISA (1895–1897 гг., 1903–1908 гг.); Бюллетень ПЦСК (1902–1907 гг., 1911–1912 гг.); бюллетени ВААС (1913–1918 гг.); бюллетени ISS (1918–1963 гг.); Бюллетень сети сейсмических станций СССР (1954–1970 гг.); бюллетени ISC (1964 г. – по настоящее время); бюллетени NEIC (1973 г. – по настоящее время).

- электронные ресурсы FDSN [FDSN, 2022], ORFEUS [ORFEUS, 2022], GEOFON [GEOFON, 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 в., сведения об их аппаратуре, а также сводные бюллетени и каталоги землетрясений начала XX в. Архив 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. Данный метод позволяет проводить локацию землетрясений при небольшом количестве макросейсмических сведений и данных лишь одной или двух сейсмических станций для территорий, которые характеризуются умеренной сейсмичностью, но долгое время не обладали плотной сетью сейсмических станций из-за малонаселённости и труднодоступности.

– Вычислены и апробированы новые региональные скоростные модели, создана комбинированная модель, состоящая из 11 региональных моделей, уточнена шкала магнитуды *ML*. Всё это 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 даёт возможность унифицировать магнитуды при создании сводных каталогов землетрясений для оценки сейсмической опасности арктических территорий.

– Выявлены «забытые» сильные землетрясения Арктики, зарегистрированные в первые десятилетия XX в. 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 г. 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 г., который позволил уточнить пространственное распределение землетрясений в регионе и предложить рекомендации по корректировке границ, значений максимально возможных магнитуд и глубин доменов в ЛДФ-моделях 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 вулканотектонических 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 решений, направленная на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений первой половины XX в., включающая в себя: сводный электронный архив бюллетеней сейсмических станций; новый метод вероятностной локации раннеинструментальных землетрясений; современный алгоритм локации, реализованный в программе NAS (New Association System), и глобальную скоростную модель *ak135*.

2. Совокупность решений, направленная на повышение достоверности определения основных параметров современных землетрясений западного сектора

Российской Арктики, включающая в себя: новые и апробированные региональные одномерные скоростные модели; комбинированную скоростную модель, состоящую из 11 региональных моделей; уточненную шкалу локальной магнитуды *ML* и корреляционные связи между магнитудами разных типов, вычисленными в различных сейсмологических центрах; современный алгоритм локации, реализованный в программе NAS (New Association System), и интеграцию цифровых данных отечественных и зарубежных сейсмических станций.

3. Уточнённый и унифицированный каталог раннеинструментальных землетрясений Арктики за период с 1904 по 1920 г., включающий «забытые» сильные землетрясения, не упоминающиеся в современных каталогах, и новый уточнённый и унифицированный каталог землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 г., отражающий зоны повышенной сейсмичности в районе желобов Франц-Виктория и Св. Анны, о. Белый, архипелагов Новая Земля и Северная Земля.

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 хребта Гаккеля с ультрамедленной скоростью спрединга, 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 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, получила экспертную оценку ученых и специалистов как составная часть отчетов о результатах фундаментальных исследований.

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, г. Триест, 2016 г.); Международных сейсмологических школах «Современные методы обработки интерпретации сейсмологических данных» (2009–2011 гг., 2022 г.); Юдахинских чтениях «Геодинамика и экология Баренц-региона в XXI веке» (г. Архангельск, 2012 г., 2014 г.); Научных чтениях памяти Ю.П. Булашевича «Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей» (г. Екатеринбург, 2013 г., 2021 г.) и др. Всего было сделано более 30 устных докладов.

**Личный вклад автора.** Формулировка цели и выбор методов диссертационного исследования, 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); Федеральных целевых программ (Госконтракты №№ 14.740.11.0195, 8331) и гранта Российского научного фонда (№ 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 монографий. 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 380 наименований и трёх приложений. Работа изложена на 286 страницах машинописного текста и содержит 71 рисунок и 35 таблиц.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность своему научному консультанту члену-корреспонденту РАН, д.т.н. Алексею Александровичу Маловичко (ФИЦ ЕГС РАН) 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). Особая благодарность д.г.-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, а также к.ф.-м.н. В.Э. Асмингу (ФИЦ ЕГС РАН), чьи современные сейсмологические программные продукты и творческое общение позволили 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 (ФГБУН 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 (ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН). Автор благодарит сотрудников лаборатории сейсмологии ФГБУН 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 и 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, обращается внимание на технические ограничения, с которыми сталкивались исследователи при изучении сейсмичности арктических территорий в течение всего инструментального периода.

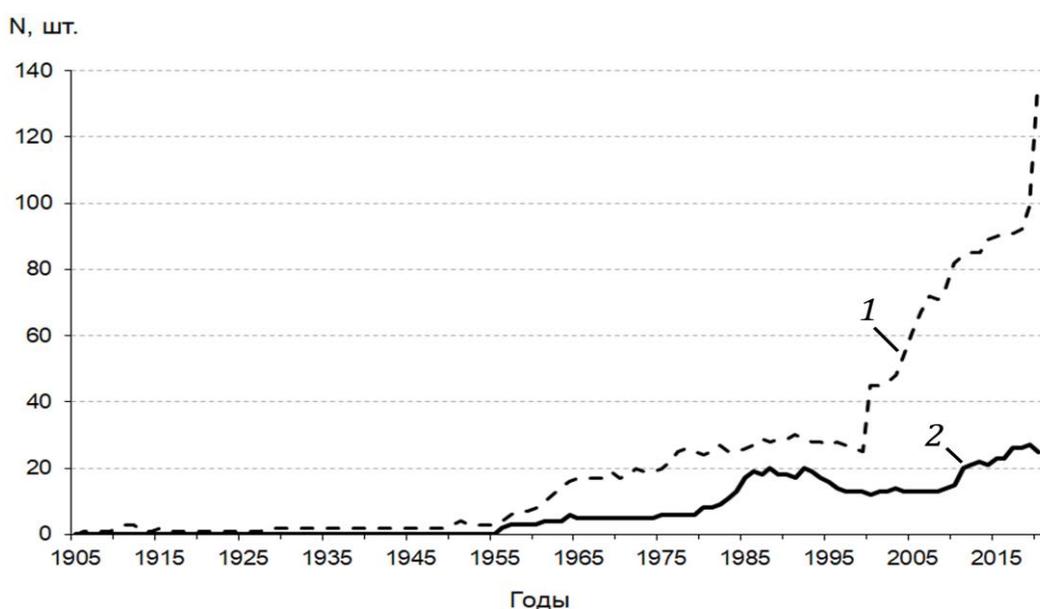
Первое землетрясение в Арктике было инструментально зарегистрировано сейсмическими станциями мировой сети 9 октября 1904 г. [Tams, 1922], а первая стационарная станция севернее Полярного Круга начала функционировать в 1906 г. в п. Вассияуре (Vassijaure) на севере Швеции [Kulhánek, 1988]. Однако из-за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

Вплоть до 1950-х годов развитие стационарных сейсмических наблюдений севернее Полярного круга практически не происходило. Поэтому первые представления о сейсмичности Арктики были получены по данным стационарных станций мировой сети и временных станций при экспедиционных исследованиях. Одно из первых обобщений сведений о сейсмичности Арктического региона в этот период приведено в работах [Tams, 1922, 1927], где впервые была выявлена зона сейсмической активности, которая протягивается между о. Гренландия и Скандинавией через о-ва Исландия, Ян-Майен и архипелаг Шпицберген. В работе [Gutenberg, Richter, 1941] приведен каталог землетрясений для Арктики за период с 1921 по 1938 г. с указанием точности определения координат. При этом в каталоге приведено меньше землетрясений, чем в более ранних работах [Райко, Лунден, 1935; Heck, 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 г. 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 опубликовано большое количество работ, посвященных сейсмичности Арктики, например,

работы Н.А. Линден [Линден, 1959, 1963], А.П. Лазаревой [Лазарева, 1963] и Е.А. Hodgson [Hodgson, 1965].

В 1960-х годах начинает развёртываться Всемирная сеть сейсмических станций (World-Wide Network of Seismograph Stations, WWSSN). К началу 1971 г. сеть насчитывала около 120 станций с однотипной аппаратурой, часть которых функционировала севернее Полярного Круга. В 1964 г. Сессия Совета по сейсмологии утвердила структуру Единой системы сейсмических наблюдений в СССР (ЕССН). Было принято, что ЕССН будет состоять 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].



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

Таким образом, благодаря расширению сети арктических станций к началу 1970-х годов представительный уровень регистрации в целом для Арктики составил 4.0–4.5 [Аветисов, 1996]. Ошибка в определении эпицентров, согласно [Wetmiller, Forsyth, 1978], составляла около 50 км для большинства землетрясений и около 20 км для сильных землетрясений. В [Новый каталог..., 1977] для землетрясений с 1963 по 1974 г. 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 суббассейне.

В течение 1970-х годов расширение сети арктических станций происходило практически только на Североамериканском континенте, главным образом на Аляске. Напротив, в 1980-е года количество арктических сейсмических станций заметно увеличилось (Рис. 1). Огромная работа по расширению сети арктических региональных станций в этот период была проведена сотрудниками Кольского научного центра АН СССР и Опытно-методической сейсмологической партии Якутского филиала Сибирского отделения Академии наук СССР.

С 1986 г. начинает функционировать Глобальная сейсмическая сеть (Global Seismic Network, GSN), созданная в партнерстве между Геологической службой США, Национальным научным фондом (NSF) и Объединенными исследовательскими институтами по сейсмологии (IRIS) [Hutt et al., 2002]. В 1990-х годах под эгидой этой сети будут открываться новые сейсмические станции в Арктическом регионе.

Сеть арктических сейсмических станций к концу 1980-х годов обеспечивала регистрацию без пропусков землетрясений с магнитудами  $M=3.9-4.0$ . 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].

Вплоть до конца XX в., 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. Вычисление параметров очагов землетрясений, зарегистрированных в течение всего XX в., 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 в. арктических сейсмических станций были доступны сейсмологам, т.к. они принадлежали сетям разных стран и организаций. Землетрясения оценивались магнитудами разных типов, вычисленными в разных международных и региональных сейсмологических центрах. Часть землетрясений не имеют магнитуд.

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 г. 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 высокочувствительной аппаратурой, существенно увеличилось (Рис. 1).

Расширилась и географическая представительность стационарных сейсмических станций. В результате, появились благоприятные условия для регистрации низкомагнитудных землетрясений и анализа пространственно-временных особенностей проявления слабой сейсмичности в разных районах Арктики, в том числе 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 в., 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, с использованием глобальных и собственных региональных скоростных 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.

Употребляемые термины «Российская Арктика» и «российский сектор Арктики» – это часть акватории и территории Арктики, на которую в соответствии с международным правом распространяется юрисдикция российского государства [Лукин, 2012]. Российский сектор Арктики в XX в. был определен на основе разграничения арктического пространства по двум меридианам от крайних западной и восточной точек сухопутной границы России до Северного полюса. В официальных документах, например, в «Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу», утвержденной 18 сентября 2008 г., чаще всего употребляется политико-правовое понятие Арктической зоны РФ. Арктическая зона России позиционируется как суша (прибрежные территории, острова) и вода (акватория морей Северного Ледовитого океана), входящих в Российскую Арктику на основе норм международного права и российских законодательных актов. Понятия «Арктической зоны РФ» и «Российской Арктики» по сути своей являются идентичными [Лукин, 2012]. Разделение на западный и восточный сектора Российской Арктики условно. Западный сектор включает географически Баренцево и Карское моря, Восточный – Восточно-Сибирское, Чукотское и море Лаптевых. Данное разделение совпадает с границами между Западно-Арктическим и Восточно-Арктическим секторами Евразийского шельфа, выделенные на основе различий во внутренней структуре и геодинамике в [Геология и полезные ископаемые России, 2004]. При этом море Лаптевых относится к пограничной области между секторами.

### ***Выводы главы 1***

В течение всего инструментального периода обширные территории Арктики были крайне неравномерно и слабо охвачены стационарными сейсмическими наблюдениями. Вычисление основных параметров землетрясений проходило в условиях малого количества станций и их удалённости от очагов, с неполным набором инструментальных данных, с применением устаревших в настоящее время скоростных моделей и алгоритмов локации. Землетрясения оценивались

магнитудами разных типов, вычисленными в разных международных и региональных сейсмологических центрах. Поэтому существует необходимость в проведении исследований по обобщению и уточнению основных параметров (гипоцентр, магнитуда) землетрясений, зарегистрированных за весь период инструментальных наблюдений.

## **Глава 2. Анализ сейсмологической информации Арктики**

В главе приведены результаты разработки совокупности решений, направленной на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений первой половины XX в. и современных землетрясений западного сектора Российской Арктики.

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

Бюллетени не всех функционировавших в течение XX в. сейсмических станций были доступны сейсмологам для оценки основных параметров землетрясений, в том числе в Арктическом регионе. Поэтому соискателем был проведен поиск бюллетеней сейсмических станций, которые функционировали в первой половине XX в., в архивах, созданных при реализации крупных специализированных научных проектов: «Historical Seismogram Filming Project» [Lee et al., 1988], «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 (J. Schweitzer) из Университета г. Осло был передан соискателю в пользование архив, состоящий из бюллетеней сейсмических станций и сводных каталогов землетрясений первой половины XX в. [Schweitzer, Lee, 2003].

В результате, был создан сводный электронный архив, содержащий бюллетени сейсмических станций, которые функционировали в первой половине XX в., и сведения об их аппаратуре, а также сводные каталоги и бюллетени землетрясений XX в. Это позволило проводить исследования по уточнению параметров ранее зарегистрированных землетрясений, прежде всего в первой половине XX в., на основе наиболее полных наборов инструментальных данных.

В конце XX и начале XXI в. 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 от очагов. Поэтому, при вычислении основных параметров низкомагнитудных 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 на официальных сайтах FDSN [FDSN, 2022], ORFEUS [ORFEUS, 2022], GEOFON [GEOFON, 2022] и 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], ФИЦ ЕГС РАН [Единая геофизическая..., 2020] и в сводном бюллетене для Европейской Арктики за период с 1990 по 2013 г. [Schweitzer et al., 2021]. Интеграция исходных данных позволит вычислять параметры современных землетрясений, в том числе в западном секторе Российской Арктики, с привлечением максимально возможного числа функционирующих сейсмических станций, расположенных в широком азимутальном створе и диапазоне эпицентральных расстояний.

В течение XX в. постепенно расширялись знания о распространении волн в Земле. 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 в. параметры землетрясений вычислялись при использовании разных скоростных моделей, устаревших в настоящее время, поэтому соискателем при уточнении параметров землетрясений по данным удалённых сейсмических станций применялась 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 скоростных моделей, т.к. глобальная модель не учитывает региональные особенности распространения сейсмических волн. Для западного сектора Российской Арктики и прилегающих территорий путём совместной инверсии *P*- и *S*-приемных функций [Vinnik, 1977] были вычислены модели: NOES [Морозов, Ваганова, 2017] для севера Баренцево-Карского региона и зоны перехода «континент–океан» и на её базе NOES\_hybrid для Евразийского суббассейна [Морозов и др., 2023]; NORP [Морозов, Ваганова, 2011] для севера Русской плиты. Для шельфовых территорий Баренцево-Карского региона применялась региональная модель BARENTS [Kremenetskaya et al., 2001].

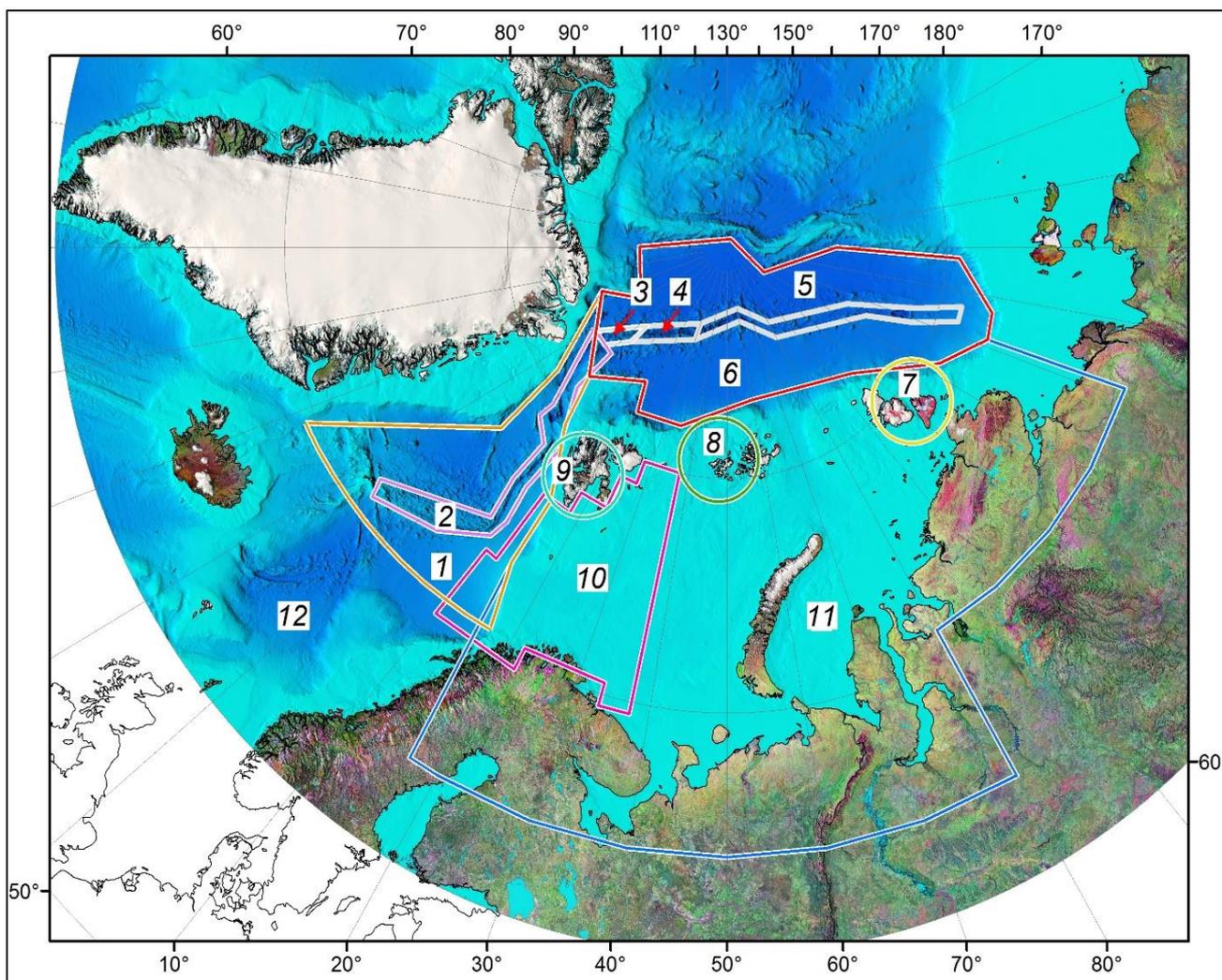
Соискателем была создана комбинированная скоростная модель для Евразийской Арктики, представляющая собой совокупность 11 одномерных скоростных моделей, каждая из которых работает в заданной географической области (регионализация по И. Бондарю, [Bondaâr, North, 1999]) (Табл. 1; Рис. 2). При регионализации на Земле задается несколько замкнутых контуров и считается, что в каждом из них действует одномерная горизонтально-слоистая скоростная модель. При расчете времени пробега из источника в приемник определяется, какая часть пути пройдена волной в каждом из контуров [Асминг и др., 2021]. Время вычисляется как взвешенное среднее времен пробега волны на полное расстояние по каждой одномерной модели

$$TT = \frac{1}{d} \cdot \sum_i d_i \cdot TT_i(d, h), \quad (1)$$

где  $TT_i(d, h)$  – годограф, полученный по  $i$ -й модели;  $d$  – расстояние от эпицентра источника до станции;  $h$  – глубина источника.

Вычисление  $d_i$  при каждом расчете времени пробега является нетривиальной задачей. Дуга от эпицентра источника  $(\varphi_1, \lambda_1)$  до приемника  $(\varphi_2, \lambda_2)$  разбивается на  $n$  равноудаленных точек  $(\varphi_i, \lambda_i)$ ,  $i=1, \dots, n$ . Для каждой точки определяется номер контура  $N(\varphi_i, \lambda_i)$ , в котором данная точка лежит. Окончательно  $TT$  оценивается как

$$TT \approx \frac{1}{n} \cdot \sum_i TT_{N(\varphi_i, \lambda_i)}(d, h). \quad (2)$$



**Рис. 2.** Комбинированная скоростная модель для Евразийской Арктики, представляющая собой совокупность одномерных скоростных моделей и используемая для локализации землетрясений в программе NAS [Асминг и др., 2021]

Линиями обозначены области, в которых действуют разные скоростные модели: 1 – Young oceans - crust age 0-20 MY на основе [Hung, Forsyth, 1999]; 2 – Knipovich на основе [Jokat et al., 2012]; 3 – Gakkel\_WVZ на основе [Schlindwein et al., 2007]; 4 – Gakkel\_SMZ на основе [Schlindwein et al., 2007]; 5 – Gakkel\_EVZ на основе [Schlindwein et al., 2007]; 6 – NOES\_hybrid; 7 – SZ; 8 – NOES [Morozov, Vaganova, 2017]; 9 – SPIT [Морозов, Ваганова, 2017]; 10 – BARENTS16 [Pirli, Schweitzer, 2018]; 11 – BARENTS [Kremenetskaya et al., 2001]; 12 – ak135 [Kennett et al., 1995]

Таблица 1. Скоростные одномерные модели, входящие в состав комбинированной модели для Евразийской Арктики

№	Скоростная модель	Географический район охвата	$H$ , км	$V_p$ , км/с	$V_s$ , км/с	Источник	Примечание
1	Young oceans - crust age 0-20 MY	Океаническая кора в районе хребта Книповича	0 0.5 1.8 6.6	3.7 5.105 6.85 8.25	2.09 2.885 3.87 4.68	На основе [Hung, Forsyth, 1999]	Дополнена моделью ak135 [Kennett et al., 1995]
2	Knipovich	Хребет Книповича	0 1 2 3.5 4.5	3.0 4.0 5.0 6.0 7.8	1.73 2.31 2.89 3.47 4.51	На основе [Jokat et al., 2012]	Дополнена моделью ak135 [Kennett et al., 1995]
3	Gakkel_WVZ	Хребет Гаккеля, западный вулканический сегмент (7° з.д.–3° в.д.)	0 2.0 3.5 7.0	3.6 4.65 7.9 8.1	2.08 2.69 4.57 4.68	На основе [Schlindwein et al., 2007]	Дополнена моделью ak135 [Kennett et al., 1995]
4	Gakkel_SMZ	Хребет Гаккеля, центральный амагматический сегмент (3° в.д.–30° в.д.)	0 2.7 5.7	4.5 7.8 8.1	2.57 4.59 4.68	На основе [Schlindwein et al., 2007]	Дополнена моделью ak135 [Kennett et al., 1995].
5	Gakkel_EVZ	Хребет Гаккеля, восточный вулканический сегмент (30° в.д.–94° в.д.)	0 2.0 7.7 16.2	2.5 4.25 7.95 8.2	1.45 2.46 4.59 4.73	На основе [Schlindwein et al., 2007]	Дополнена моделью ak135 [Kennett et al., 1995].
6	NOES_hybrid	Океаническая кора в районе хребта Гаккеля	0 4 15 20 71.5 210 260 >310	4.30 6.10 6.90 8.00 8.10 8.37 8.60 8.665	2.36 3.50 3.85 4.60 4.65 4.67 4.80 4.696	[Морозов и др., 2023]	Дополнена моделью ak135 [Kennett et al., 1995].
7	SZ	Район архипелага Северная Земля	0 9 12 20 31 43 85	5.1 6.2 6.8 7.3 8.1 8.2 8.5	3.1 3.4 3.5 3.6 4.1 4.5 4.7	-	Вычислена по данным стационарной станции SVZ методом $P$ -приемных функций [Vinnik, 1977]. Дополнена моделью ak135 [Kennett et al., 1995].
8	NOES	Район архипелага Земля Франца-Иосифа	0 4 17 30 43 71 >210	4.3 6.1 6.8 8.15 8.25 8.35 8.37	2.36 3.6 3.94 4.52 4.75 4.81 4.56	[Морозов, Ваганова, 2017]	Дополнена моделью iasp91 [Kennett, Engdahl, 1991]
9	SPIT	Район архипелага Шпицберген	0 17 35 71 271	5.77 6.75 8.4 8.48 8.523	3.33 3.90 4.60 4.60 4.628	[Морозов, Ваганова, 2017]	Вычислена по данным стационарной станции SPA0 методом $P$ -приемных функций [Vinnik, 1977].

№	Скоростная модель	Географический район охвата	$H$ , км	$V_p$ , км/с	$V_s$ , км/с	Источник	Примечание
							Дополнена моделью <i>ak135</i> [Kennett et al., 1995]
10	BARENTS16	Запад шельфа Баренцева моря	0 20 36 75 210	5.87 6.09 8.03 8.14 8.30	3.42 3.51 4.69 4.73 4.72	[Pirli, Schweitzer, 2018]	Дополнена моделью <i>ak135</i> [Kennett et al., 1995]
11	BARENTS	Шельф Баренцев-Карского региона. Севера ВЕП	0 16 40 55	6.20 6.70 8.10 8.23	3.58 3.87 4.60 4.68	[Kremenetskaya et al., 2001]	Дополнена моделью <i>iasp91</i> [Kennett, Engdahl, 1991]
12	<i>ak135</i>	За пределами границ района регионализации	-	-	-	[Kennett et al., 1995]	Фоновая модель

Тестирование новых и ранее вычисленных региональных скоростных 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: 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. 3). Ядерный взрыв 1974 г. является событием «ground-truth» категории GT5 по [Yang et al., 2000], т.е. параметры эпицентра известны с точностью до 5 км, а взрывы 1985, 1988 и 1990 гг. являются событиями категории GT1 – параметры известны с точностью до 1 км.

Существуют территории, которые характеризуются умеренной сейсмичностью, однако долгое время не обладали плотной сетью сейсмических станций из-за малонаселённости, труднодоступности и невысокого уровня их экономического развития. Для таких территорий характерны землетрясения, по которым имеется небольшое количество макросейсмических сведений и данные лишь по одной или двум сейсмическим станциям. Чаще всего при локации таких землетрясений использовались только макросейсмические сведения. Поэтому для таких землетрясений был создан метод вероятностной локации, основанный на применении наивного Байесовского классификатора и использующий совместно как макросейсмические сведения, так и инструментальные данные [Морозов и др., 2023].

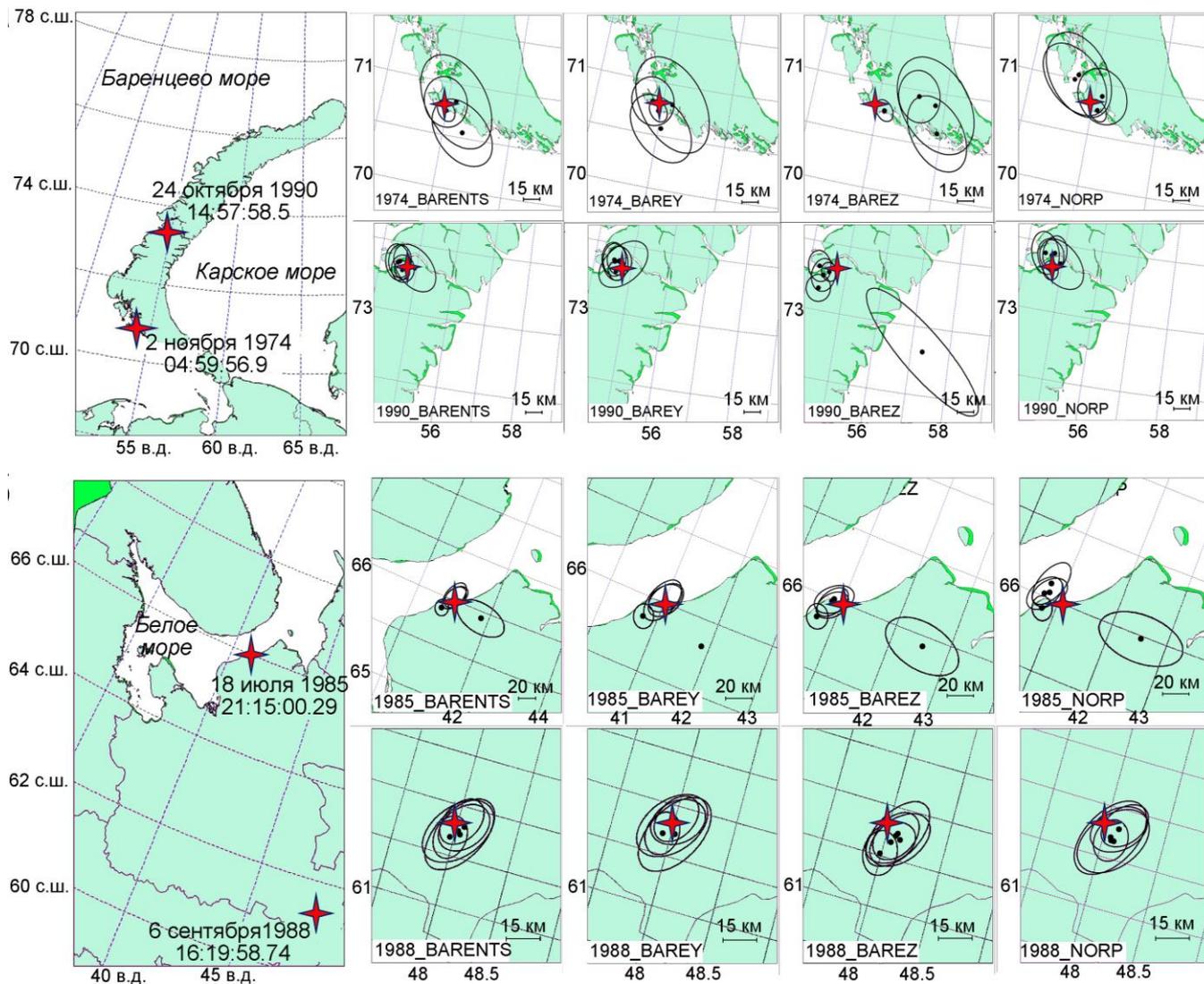
Теорема Байеса из теории вероятности выражается следующим соотношением:

$$P(C|F_1, \dots, F_n) = \frac{P(C)P(F_1, \dots, F_n|C)}{P(F_1, \dots, F_n)}. \quad (3)$$

В нашем случае  $C$  – событие, заключающееся в том, что землетрясение произошло в некоторой области проявлений ( $F_1, \dots, F_n$ ) этого события. Проявления

могут быть как макросейсмические – сотрясения некоторой интенсивности в тех или иных пунктах, так и инструментальные – приходы сейсмических волн на станции. Предположение наивности – это предположения о том, что  $(F_1, \dots, F_n)$  – независимы, а априорные вероятности вариантов события  $C$  заранее неизвестны. Чтобы упростить формулу, положим их одинаковыми. С учетом этого, (3) можно переписать в виде

$$P(C|F_1, \dots, F_n) \sim \prod_i P(F_i|C). \quad (4)$$



**Рис. 3.** Тестирование региональных скоростных моделей с использованием подземных ядерных взрывов [Мухайлов 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 (овалы) для наборов данных по временам вступлений на сейсмических станциях 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]

Здесь  $P(F_i|C)$  имеет смысл вероятности проявления  $F_i$  при условии, что произошло событие  $C$ , т.е., что землетрясение произошло в тестируемой области. Далее мы предполагаем, что гипоцентр события магнитуды  $M$  (магнитуду и

глубину фиксируем) с вероятностью 1 располагался в некоторой области на поверхности Земли. Разобьем эту область на маленькие элементы  $c_j$  и будем с помощью (4) оценивать вероятности  $P(c_j|F_1, \dots, F_n)$ , т.е. вероятности того, что событие произошло в данной ячейке при условии, что имели место его проявления  $F_i$ . Для нормировки воспользуемся тем, что вероятность того, что землетрясение произошло в большой области, равна 1, т.е.

$$\sum_j P(c_j|F_1, \dots, F_n) = 1 \quad (5)$$

Чтобы воспользоваться (4) нужно оценивать  $P(F_i|c_j)$  для макросейсмических и инструментальных данных.

#### *Макросейсмические данные*

Проявление  $F_i$  – информация о том, что в некоторой точке с координатами  $(\varphi_i, \lambda_i)$  событие ощущалось в диапазоне интенсивностей (по шкале МСК-64) от  $I_{i0}$  до  $I_{i1}$ . Существуют известные формулы, связывающие магнитуду землетрясения и расстояние от эпицентра до точки наблюдения с интенсивностью, например, формула Блэйка–Шебалина. В общем виде ее можно записать как

$$I_{\text{истинная}} = I(M, R),$$

где  $R$  – расстояние до гипоцентра землетрясения в км, определяемое через расстояние до эпицентра  $r$  и глубину очага  $h$ , как  $\sqrt{r^2 + h^2}$ .

Назовем интенсивность, рассчитанную по этой формуле «истинной». Разумеется, она истинна только в том случае, если в данной точке действительно произошло событие данной магнитуды. Тогда оценка  $P(F_i|c_j)$  сводится к оценке вероятности  $P([I_{i0}, I_{i1}]|I_{\text{истинная},j})$ , т.е. оценке вероятности того, что свидетель, находившийся в точке  $i$ , зафиксировал интенсивность из диапазона  $[I_{i0}, I_{i1}]$  при условии, что в реальности имела место интенсивность  $I_{\text{истинная},j}$ . Введем эмпирическую функцию плотности вероятности того, что наблюдатель зафиксировал интенсивность  $I_{\text{набл}}$  при условии того, что на самом деле имела место интенсивность  $I_{\text{истинная}} - \rho(I_{\text{набл}}|I_{\text{истинная}})$ . Эта функция вводится интерпретатором из некоторых рациональных соображений и задается в табличном виде. Таким образом, с точностью до нормировки, мы имеем следующее выражение:

$$P(F_i|c_j) = P([I_{i0}, I_{i1}]|I_{\text{истинная},j}) \sim \max_{I_{\text{набл}} \in [I_{i0}, I_{i1}]} \rho(I_{\text{набл}}|I_{\text{истинная},j}). \quad (6)$$

#### *Инструментальные данные*

Инструментальные данные, которые предполагается использовать в данном подходе – это замеры времен приходов сейсмических волн на станции, сделанные по аналоговым сейсмограммам, которые получены в начале XX в. У таких сейсмограмм есть специфические особенности – неточная привязка ко времени и невозможность достоверно определить тип пришедшей волны. Указанные особенности обуславливают совместное использование в данном подходе времен приходов, взятых для одной и той же станции, и применение вероятностной оценки, задаваемой пользователем, вместо однозначного задания типа фазы.

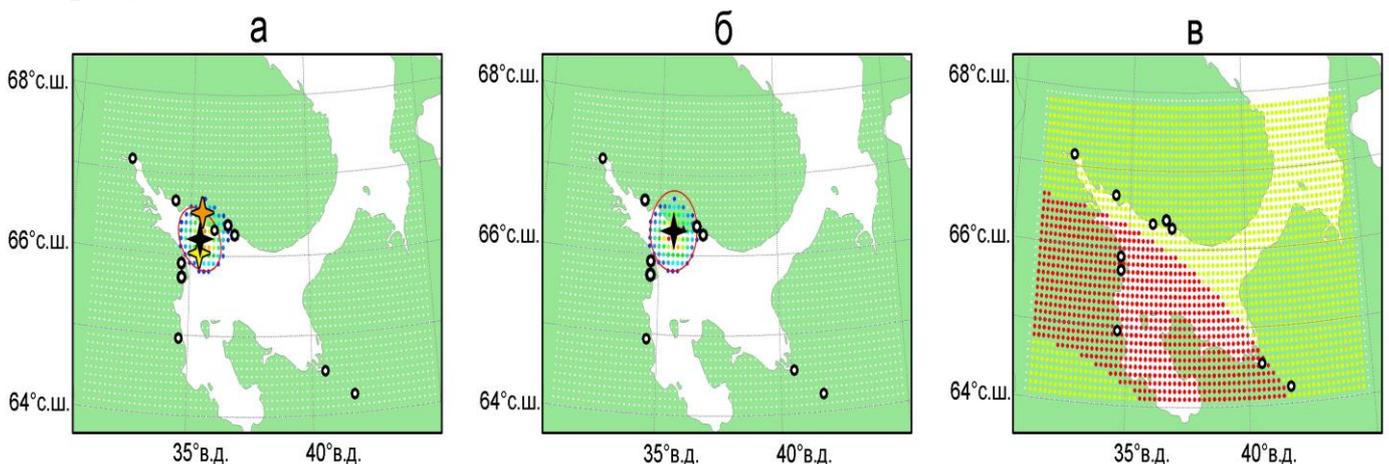
Пусть для некоторой сейсмостанции задано  $N$  фаз с временами  $t_i$  и вероятностями типов фаз  $P_{ik}$ , где  $i$  – индекс фазы, а  $k$  – индекс типа фазы от 1 до 4 ( $P$ -,  $S$ -,  $Lg$ -волны и ложное вступление). Назовем совместимой парой две фазы  $i_1$  и  $i_2$ , которым приписаны типы волн  $k_1$  и  $k_2$ , такую, что:

$$T_{0,k_2} - T_{1,k_1} < t_{i_1} - t_{i_2} < T_{1,k_2} - T_{0,k_1}, \quad (7)$$

где  $T_{0,k}$  – минимальное, а  $T_{1,k}$  – максимальное время пробега волны типа  $k$  от источника до станции с учетом возможных ошибок взятия вступлений и скоростной модели. Также совместимыми будут считаться те пары, у которых одной из фаз приписан тип «ложное вступление». Окончательной оценкой реализации варианта с данными замера для данной точки и для данной станции, которая и используется в качестве множителя в (4), будет

$$\sum_{\text{по совместимым парам}} P_{i_1, k_1} \cdot P_{i_2, k_2}. \quad (8)$$

Описанный метод был реализован в программе ProLom (Probabilistic Locator by Macroseismics) [Асминг, Морозов, 2023]. Программа позволяет пользователю задавать макросейсмическую информацию (ощущавшиеся интенсивности по шкале МСК-64 в определенных пунктах), добавлять к ней инструментальную информацию (замеры времен приходов сейсмических волн на станции) и получать вероятностную оценку локации сейсмических событий. Пример применения данного метода для землетрясения 30.06.1911 г., для которого имеется ограниченное количество макросейсмических сведений [Никонов, Пономарёва, 2008] и инструментальные данные только по станции PUL (Пулково), представлен на рисунке 4.



**Рис. 4.** Результат расчета программы ProLom на основе бюллетеня, составленного из макросейсмических и инструментальных данных для землетрясения 30.06.1911 г.

*а* – решение на основе макросейсмических и инструментальных данных; *б* – решение только на основе макросейсмических данных; *в* – область, вычисленная на основе инструментальных данных, в которой должен располагаться эпицентр. Черной звездой указан вычисленный эпицентр землетрясения; оранжевой – эпицентр землетрясения по данным [Новый каталог..., 1977]; желтой – эпицентр по данным [Никонов, Пономарёва, 2008]; красным овалом – эллипс ошибок; кружками – географические пункты, для которых имеются значения интенсивности  $I$ ; разноцветными точками – ячейки, в которых значение вероятности наличия в этой ячейке эпицентра отлично от нуля. Градация цвета зависит от значения вероятности: от меньшего (синего) до большего (красного)

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 полезны для процесса уточнения параметров землетрясений на основе бюллетеней сейсмических станций первой половины XX в. Во-первых, алгоритм программы игнорирует ошибочные времена вступлений сейсмических фаз, которые возникли из-за действий оператора или неисправности аппаратуры. Во-вторых, в бюллетенях нередки 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 картирования была создана программа Seisactivity [Алёшин, Морозов, 2022]. Понятие о 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 сопоставлять друг с другом различные сейсмоактивные области.

Магнитуда – одним из фундаментальных параметров, используемых в каталогах землетрясений. Понятие магнитуды было введено после нескольких десятилетий с момента создания первых сейсмометров 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  $20^\circ$  до  $160^\circ$  с применением формулы [Ванек и др., 1962]

$$MS = \log(A/T)_{max} + 1.66 \lg(\Delta) + 3.3. \quad (9)$$

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]

$$ML = \lg A - \lg A_0(R) + S, \quad (10)$$

$$-\lg A_0(R) = 1.5 \cdot \lg(R/100) + 1.0 \cdot 10^{-4}(R-100) + 3.0. \quad (11)$$

Как уже отмечалось, землетрясения в Арктике оценивались магнитудами разных типов, вычисленными в разных международных и региональных сейсмологических центрах. Соискателем было проведено исследование по выявлению корреляционных соотношений между такими магнитудами [Морозов и др., 2022]. В результате, получено 40 соотношений между магнитудами разных типов, 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; 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 в диссертационной работе корреляционные соотношения между магнитудами разных типов, 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.

На основе полученных результатов была создана совокупность решений, направленная на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений первой половины XX в. и современных землетрясений западного сектора Российской Арктики, представленная в таблице 2.

Таблица 2. Совокупность решений, направленная на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений первой половины XX в. и современных землетрясений западного сектора Российской Арктики, и сравнение с ранее использованными подходами

	В ранних исследованиях на разных временных этапах	Совокупность решений по определению основных параметров (гипоцентр, магнитуда) землетрясений в настоящем исследовании	
		Для землетрясений XX в.	Для землетрясений XXI в.
<b>Исходные данные</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Доступные исследователям бюллетени и исходные данные сейсмических станций.</li> <li>– Сборники «Shide Circulars» (1899–1912 гг.).</li> <li>– Бюллетени ISA (1895–1897 гг., 1903–1908 гг.).</li> <li>– Бюллетень ПЦСК (1902–1907 гг., 1911–1912 гг.).</li> <li>– Бюллетени ВААС (1913–1918 гг.).</li> <li>– Бюллетени ISS (1918–1963 гг.).</li> <li>– Сводный кварталный бюллетень сети телесеизмических станций (1928–1939 гг.).</li> <li>– Копии записей Б. Гетенберга «Gutenberg Notepads» [Goodstein et al., 1980].</li> <li>– Бюллетени BCIS (1930–1971 гг.).</li> <li>– Бюллетень сети сейсмических станций</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Сводный электронный архив, содержащий бюллетени сейсмических станций первой половины XX в. и сведения об их аппаратуре, сборники «Shide Circulars» (1899–1912 гг.), Бюллетень ПЦСК (1902–1907 гг., 1911–1912 гг.), бюллетени ISA (1895–1897 гг., 1903–1908 гг.), ВААС (1913–1918 гг.), ISS (1918–1963 гг.).</li> <li>– Бюллетень сети сейсмических станций СССР/Сейсмологический бюллетень сети опорных сейсмических станций СССР (1940–1987 гг.).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Интеграция исходных цифровых данных сейсмических станций, функционирующих в регионе, из следующих источников: электронные ресурсы FDSN, GEOFON, ORFEUS и IRIS; архивы ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН и ФИЦ ЕГС РАН.</li> <li>– Бюллетени ISC.</li> <li>– Бюллетени ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН.</li> <li>– Бюллетень ФИЦ ЕГС РАН.</li> <li>– Сводный бюллетень для Европейской Арктики за период с 1990 по 2013 г. [Schweitzer et al., 2021].</li> </ul>

	<p>СССР/Сейсмологический бюллетень сети опорных сейсмических станций СССР (1940–1987 гг.).</p> <p>– Бюллетени ISC (1964 г. – по настоящее время).</p> <p>– Бюллетени NEIC (1973 г. – по настоящее время).</p> <p>– Бюллетени ФИЦ ЕГС РАН (1994 г. – по настоящее время).</p> <p>– Электронные ресурсы FDSN, GEOFON, ORFEUS и IRIS.</p>	<p>– Бюллетени ISC (с 1964 г. – по настоящее время).</p> <p>– Бюллетени NEIC (1973 г. – по настоящее время).</p> <p>– Бюллетени ФИЦ ЕГС РАН (1994 г. – по настоящее время).</p>	
<b>Скоростная модель</b>	<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>– Глобальная модель 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>	
<b>Алгоритм локации</b>	<p>Различные методы локации, применяемые в сейсмологии, которые описаны в [Havskov, Ottemöller, 2010; Karasözen, Karasözen, 2020].</p>	<p>– Алгоритм программы ProLom (Probabilistic Locator by Macroseismics) [Асминг, Морозов, 2023], основанный на предложенном в [Морозов и др., 2024] 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 [Ringdal, Kvaerna, 1989], и минимизации невязки оценки времени в очаге.</p>	
<b>Оценка магнитуды</b>	<p>– ML [Richter, 1935, 1958].</p> <p>– mB/MS по [Gutenberg, 1945].</p> <p>– MS [Ванек и др., 1962].</p> <p>– MLH [Новый каталог..., 1977].</p> <p>– Mw [Kanamori, 1977].</p> <p>– MS<sub>BB</sub>/m<sub>B</sub><sub>BB</sub> [Bormann, Saul, 2008].</p>	<p>– Для удалённых землетрясений вычисление магнитуды MS по [Ванек и др., 1962].</p> <p>– Для региональных землетрясений использование уточненной шкалы локальной магнитуды ML [Морозов и др., 2020].</p> <p>– Применение полученных в диссертационной работе соотношений между магнитудами разных типов, вычисленные в разных зарубежных и отечественных сейсмологических центрах.</p> <p>– Использование соотношений между магнитудами разных типов, опубликованных в [Аветисов, 1996; Di Giacomo et al., 2015; Petrova, Gabsatarova, 2020; Петрова, Курова, 2023].</p>	

## Выводы главы 2

Создана совокупность решений, направленная на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений первой половины XX в. и современных землетрясений западного сектора Российской Арктики.

Совокупность включает в себя новые и апробированные региональные одномерные скоростные модели; комбинированную скоростную модель для Евразийской Арктики, состоящую из 11 региональных моделей; глобальную скоростную модель *ak135*; уточненную шкалу локальной магнитуды *ML* и корреляционные связи между магнитудами разных типов; новый метод вероятностной локации раннеинструментальных землетрясений, реализованный в программе ProLom (Probabilistic Locator by Macroseismics); современный алгоритм локации, реализованный в программе NAS (New Association System); сводный электронный архив бюллетеней сейсмических станций первой половины XX в. и интеграция цифровых данных отечественных и зарубежных сейсмических станций, функционирующих в XXI в. Полученные в главе результаты доказывают первое и второе защищаемые положения.

### **Глава 3. Сейсмичность Арктики в начале XX в.**

В главе представлены результаты обобщения сведений о землетрясениях Арктики, произошедших в начале XX в., уточнения основных их параметров и создания уточнённого и унифицированного каталога землетрясений за период с 1904 по 1920 г. Вычисление параметров землетрясений проводилось на основе совокупности решений, описанной в главе 2.

Развитие инструментальных наблюдений в Европе в конце XIX и начале XX в., особенно с открытием сейсмических станций Берген (1904 г.), Вассияуре (1906 г.), Пулково (1906 г.) и Рейкьявик (1909 г.), 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 в., 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.

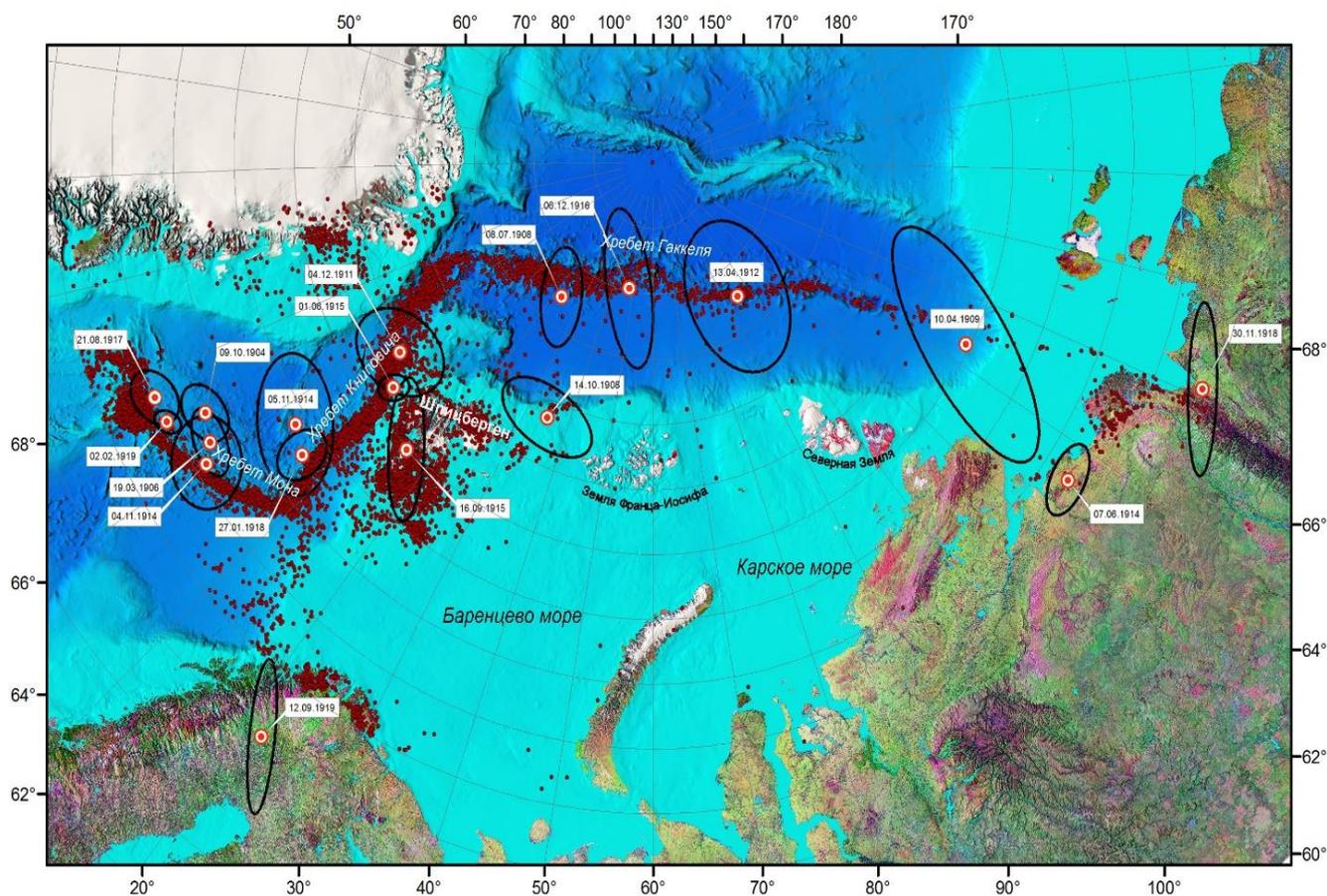
На основе данных из [Tams, 1922, 1927; Gutenberg, Richter, 1954; Лунден, 1959; *Новый каталог...*, 1977], International Seismological Summary за период с 1917 по 1919 г. и каталога ISC-GEM [Storchak et al., 2015] составлен предварительный сводный каталог землетрясений, произошедших за период с 1904 по 1920 г., эпицентры которых располагаются выше  $70^\circ$  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 и каталогах не упоминаются.

Для каждого землетрясения из предварительного каталога применялась описанная в главе 2 совокупность решений с целью уточнить их основные параметры (эпицентр, магнитуда). Для землетрясений рассчитывалась магнитуда *MS* по [Ванек и др., 1962]. Если для землетрясения была вычислена магнитуда *M<sub>w</sub>* 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]

$$M \leq 3.3 \log h + 3.1. \quad (12)$$

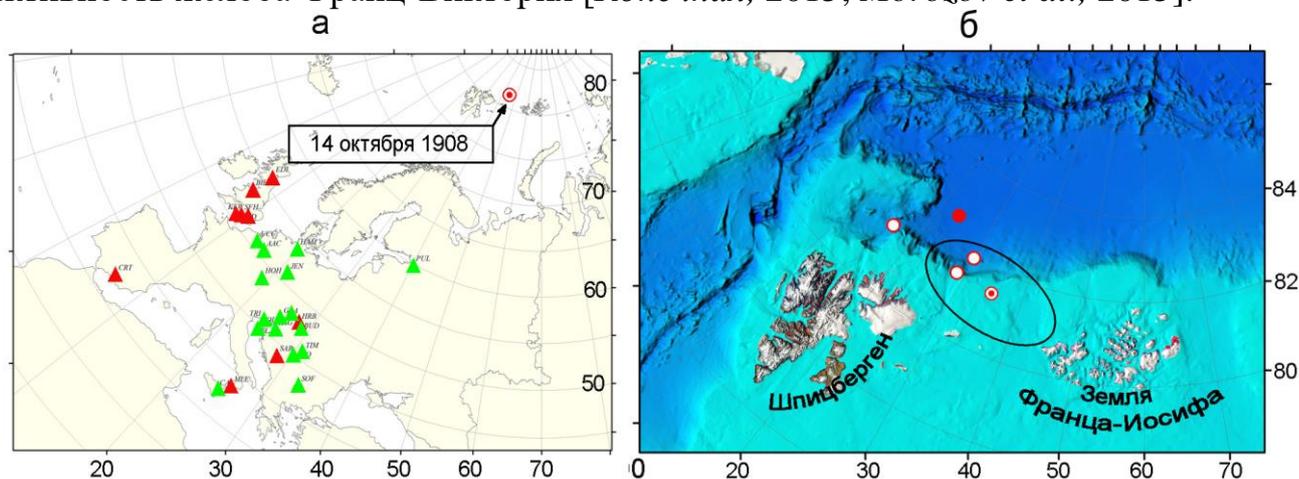
За первые два десятилетия XX в. в Арктике было зарегистрировано 25 сильных землетрясений (Рис. 5), которые имеют большое значение как для понимания общих закономерностей сейсмического процесса в Арктике, так и для задачи оценки сейсмической опасности. Начало инструментального периода в Арктике можно отсчитывать с момента регистрации землетрясения 9 октября 1904 г. В период с 1904 по 1911 г. сейсмические станции мировой сети в Арктике регистрировали землетрясения с магнитудами от 6.3. После 1912 г., уже регистрировались землетрясения с магнитудами от 5.5. Большинство землетрясений приурочено к основным сейсмоактивным зонам Арктики – срединно-океаническим хребтам, архипелагу Шпицберген и шельфу моря Лаптевых.



**Рис. 5.** Карта с обозначением уточнённых эпицентров землетрясений Арктики за период с 1904 по 1920 г. (кружок с точкой) и эпицентров современных землетрясений по данным ISC [International ..., 2020] за период с 2000 по 2016 г.

На шельфе Баренцева моря в зоне перехода «континент–океан» к северо-западу от архипелага Земля Франц-Иосифа 14 октября 1908 г. произошло землетрясение с магнитудой  $M_w(\text{ISC})=6.6$  (Рис. 6). 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 в течение инструментального периода. В-третьих, современные исследования слабой сейсмичности переходной зоны «континент–океан» подтверждают сейсмическую активность желоба Франц-Виктория [Конечная, 2015; Morozov et al., 2015].

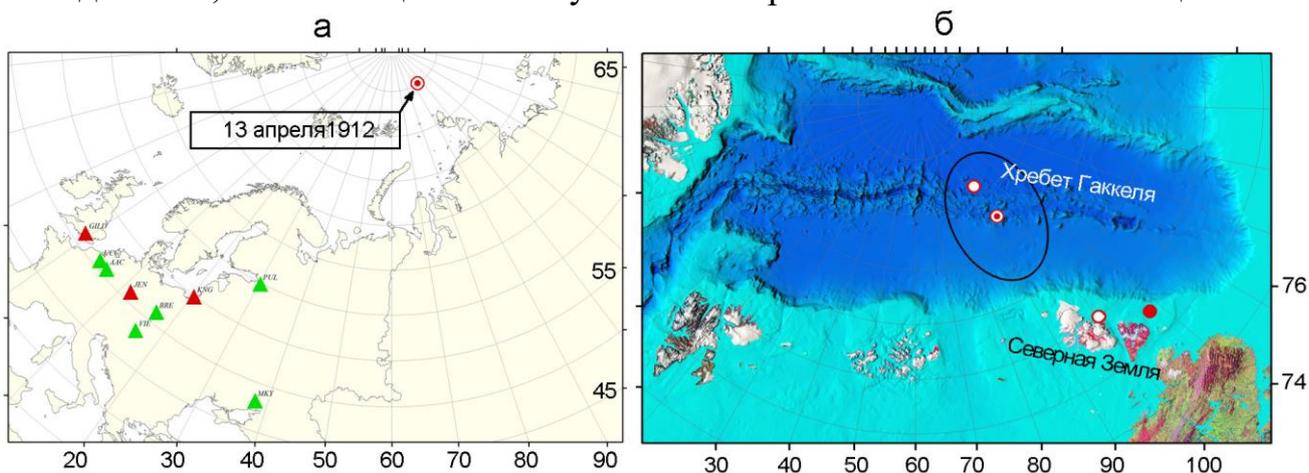


**Рис. 6.** Карта сейсмических станций (слева), зарегистрировавших землетрясение 14 октября 1908 г., и карта (справа) с уточнённым эпицентром землетрясения (кружок с точкой). Эллипс ошибок отображается черным овалом. Красным кружком отмечен эпицентр из каталога ISC-GEM [Storchak et al., 2015]; полными кружками – эпицентры по [Tams, 1922; Gutenberg, Richter, 1954; Лунден, 1959]. Зелеными треугольниками показаны станции, времена вступлений которых использовались в процедуре уточнения; красными треугольниками – станции, для которых времена вступлений от землетрясения были отклонены.

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. 7). 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 станции SVZ, установленной на архипелаге в 2016 г., не указывают на наличие сейсмоактивных зон непосредственно в районе архипелага.

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. Данные землетрясения требуют дополнительных исследований, включающих анализ уже сейсмограмм сейсмических станций.



**Рис. 7.** Карта сейсмических станций (слева), зарегистрировавших землетрясение 13 апреля 1912 г., и карта (справа) с уточнённым эпицентром землетрясения (кружок с точкой)

Красным кружком отмечен эпицентр по [Новый каталог..., 1977]; полыми кружками – эпицентры по [Tams, 1922; Gutenberg, Richter, 1954]. Остальные обозначения аналогичны рисунку б.

### **Выводы главы 3**

Параметры гипоцентров землетрясений, зарегистрированных в Арктике в начале XX в. и вычисленные исследователями в первой половине XX в., 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 в., с применением устаревших скоростных моделей и алгоритмов локации. С применением совокупности решений, описанной в главе 2, создан уточнённый и унифицированный каталог землетрясений Арктики за период с 1904 по 1920 г., включающий «забытые» сильные землетрясения, не упоминающиеся в современных каталогах, и содержащий параметры эпицентров для большей части землетрясений, существенно отличающиеся от первоначальных, приведенных в различных источниках. Полученные в главе результаты являются частью доказательства третьего защищаемого положения.

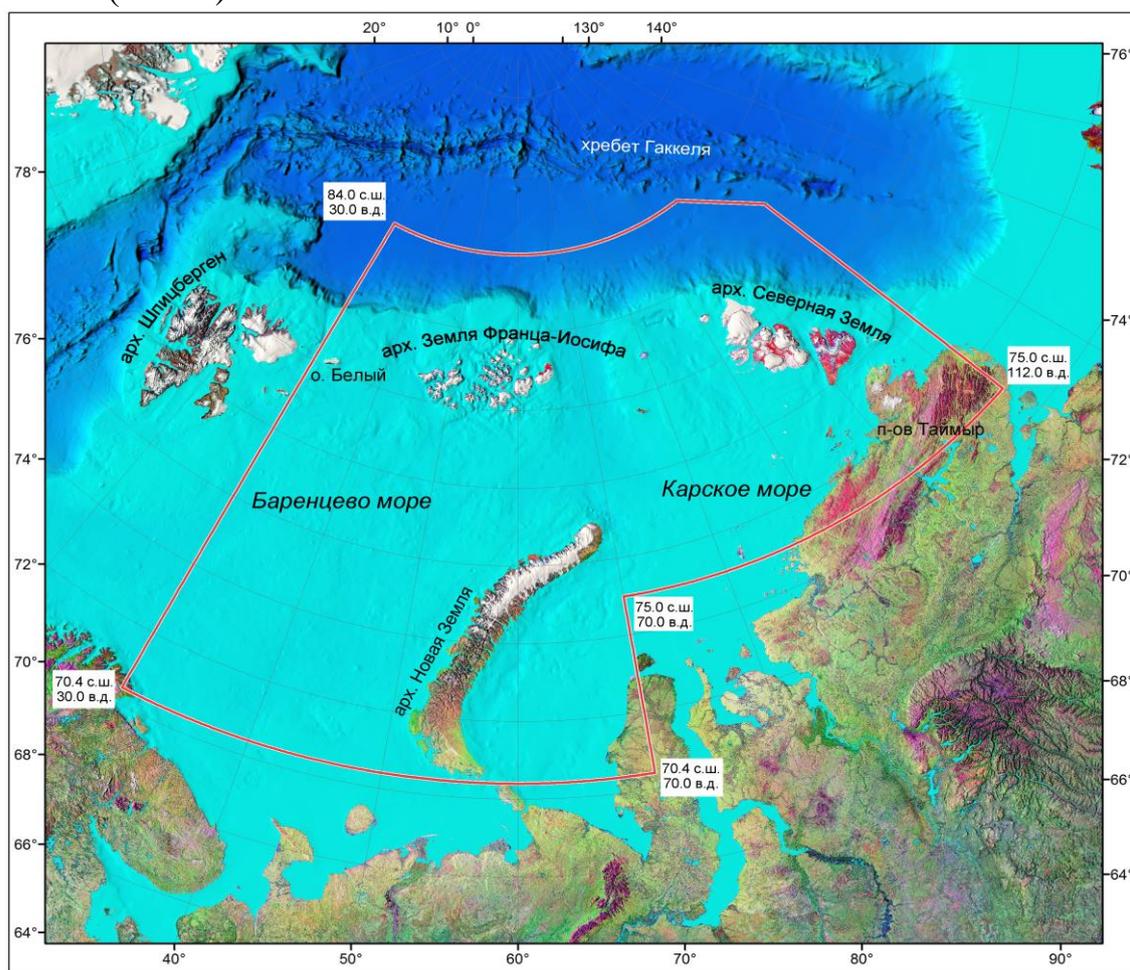
### **Глава 4. Сейсмичность Баренцево-Карского региона**

В главе описаны результаты исследований по уточнению основных параметров 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 г. Вычисление параметров землетрясений проводилось на основе совокупности решений, описанной в главе 2.

Баренцево и Карское моря омывают северную оконечность Евразийского континента и занимают один из самых широких континентальных шельфов в мире. 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 функционировавшим до 1990 г. ядерным полигоном. А зона перехода «континент–океан» в плане изучения проявления слабой сейсмичности практически до настоящего времени относилась к малоизученной территории.

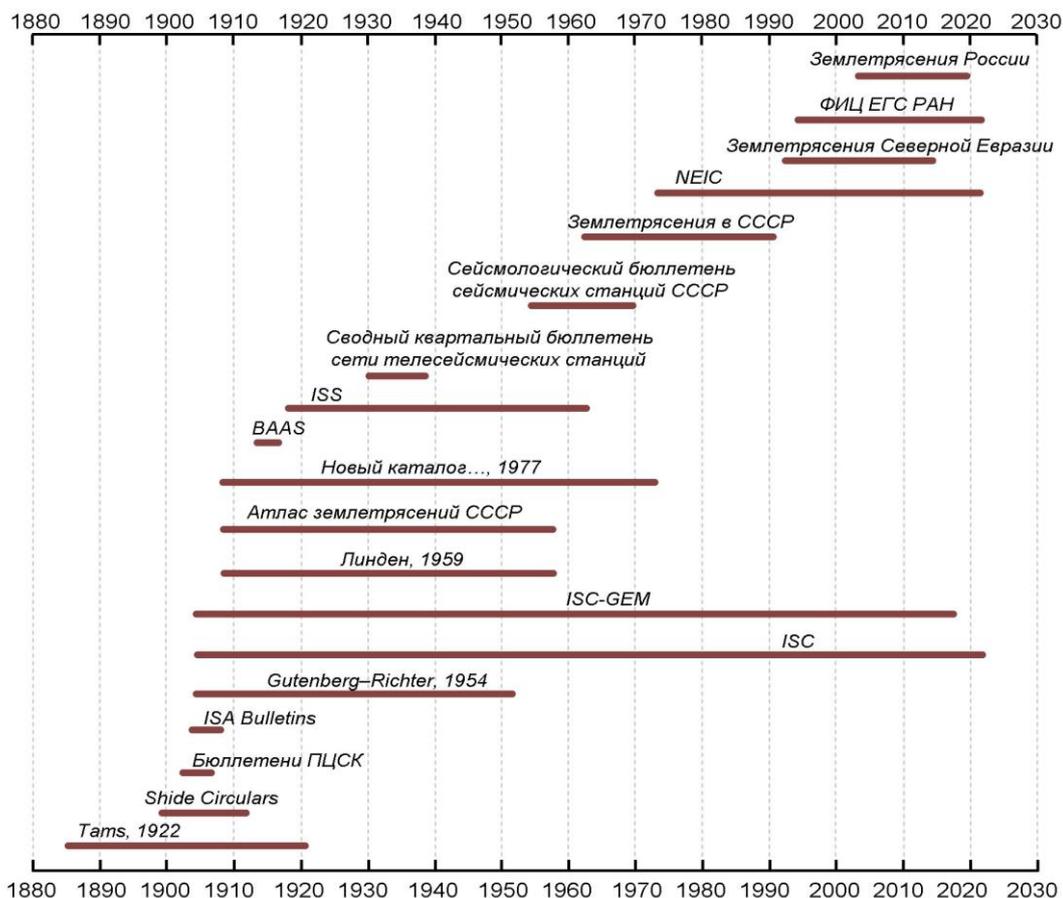
Составление сводного предварительного каталога землетрясений для западного сектора Российской Арктики за период с начала XX в. по 2020 г. производилось в пределах границ района (Рис. 8) и на основе данных из различных источников (Рис. 9).



**Рис. 8.** Карта с обозначением района исследования по обобщению, анализу и уточнению основных параметров землетрясений западного сектора Российской Арктики за весь инструментальный период наблюдений

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.



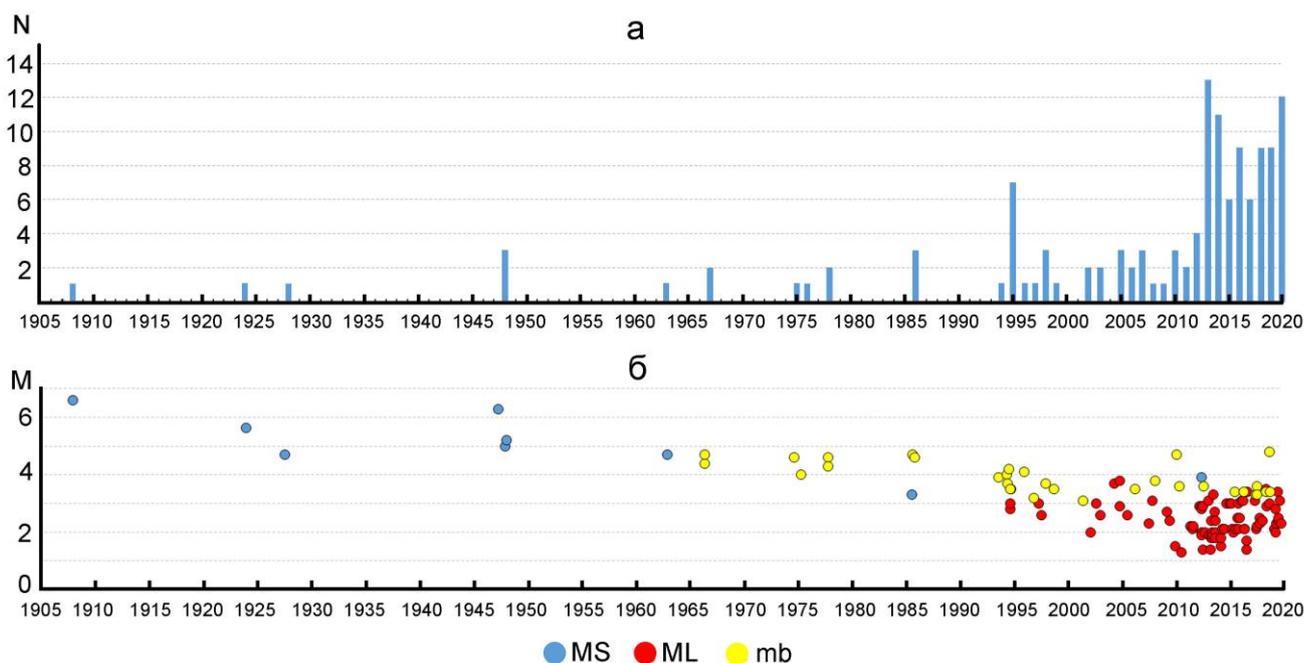
**Рис. 9.** Список использованных источников для поиска информации о землетрясениях, зарегистрированных в западном секторе Российской Арктики

Итоговым результатом исследования является создание двух каталогов. 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 г. Второй каталог включает в себя землетрясения, которые в различных источниках отнесены к району исследования, но в процессе уточнения их параметров были приурочены к сейсмоактивным районам за пределами района исследования. Также каталог включает 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 12.12.1974 г., 15.11.1978 г. и 09.12.1989 г. в каталоге указано, что они, вероятно, имеют техногенную природу. Уточнённые эпицентры событий 12.12.1974 г. и 15.11.1978 г. попадают в район полигона на архипелаге Новая Земля, а эпицентр события 09.12.1989 г. – в район крупного промышленного карьера на Кольском полуострове.

Распределение количества землетрясений из уточнённого каталога по годам представлено на рисунке 10. Отчётливо видно, что с начала XX в. и до 1990-х годов регистрировались только единичные сейсмические события в пределах района исследования. В период с 1990 по 2000 г., 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.



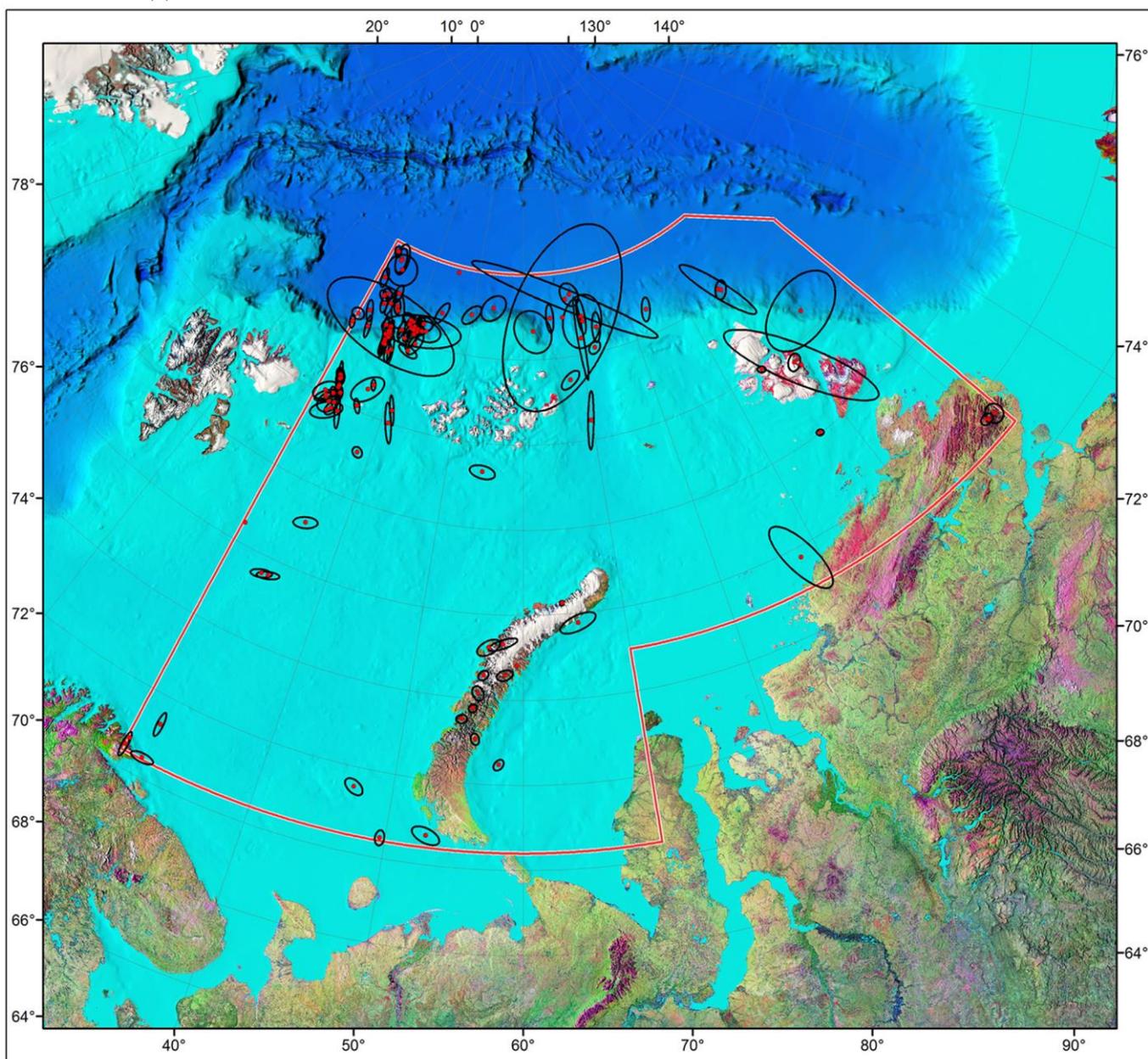
**Рис. 10.** Распределение землетрясений по годам из созданного уточнённого каталога землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 г.

*a* – по количеству землетрясений; *б* – по магнитудам *mb*, *MS* и *ML*

Однако более 60% всех землетрясений из каталога было зарегистрировано в период начиная с 2012 по 2020 г. Как уже отмечалось, в конце XX и в начале XXI в. 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 1990-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 1990-х годов 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 границах западного сектора Российской Арктики наибольшая сейсмичность проявляется в пределах зоны перехода «континент–океан» и о. Белый, архипелагов Новая Земля и Северная Земля (Рис. 11). Сам шельф Баренцева и Карского морей характеризуется редкой и рассеянной сейсмичностью. Также в район исследования попадают фрагменты сейсмичности, характерной для п-ва Таймыр и севера Фенноскандии.



**Рис. 11.** Карта с обозначением эпицентров землетрясений из созданного сводного уточнённого и унифицированного каталога землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 г.

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 сейсмически активным районом в Баренцево-Карского регионе после архипелага Шпицбергена.

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 (2–3 км) проливом Маточкин Шар 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 может быть приурочено к субмеридиональным разломам.

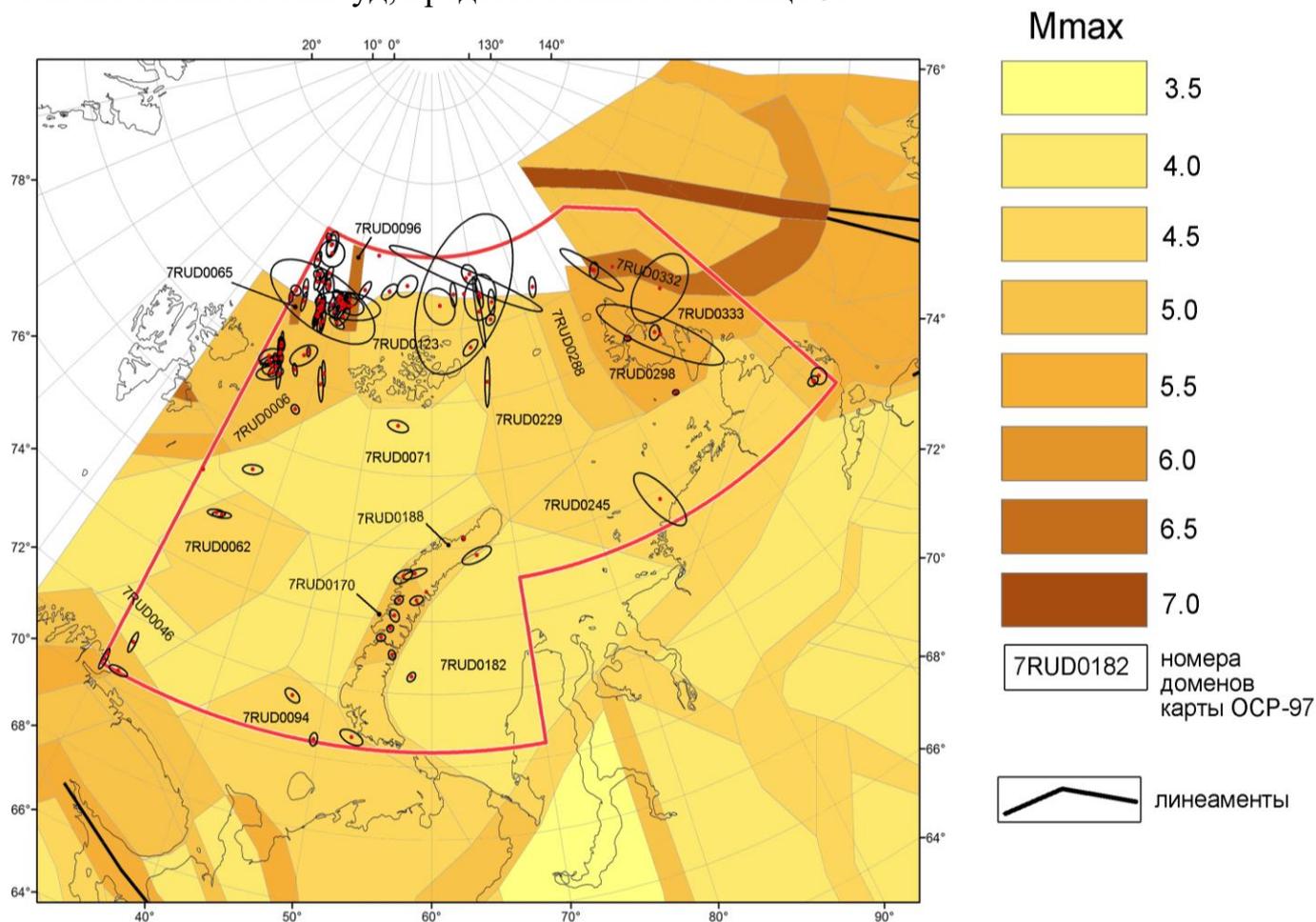
Для большинства землетрясений в пределах архипелага удалось вычислить диапазоны возможных глубин. Для землетрясений, произошедших в пределах о. Северный, характерны глубины в нижнем слое коры. Землетрясения, произошедшие в районе о. Южный и в акваториях Баренцева и Карского морей, диапазон возможных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

Только землетрясение 19 октября 1924 г. из всех землетрясений первой половины XX в. можно отнести к континентальному склону вблизи от архипелага Северная Земля. Остальные, которые в разных источниках приурочены к архипелагу, были отнесены к срединно-океаническому хребту Гаккеля. В каталоге [Новый каталог..., 1977] указана магнитуда землетрясения, равная  $MLH=4.5$ . Было пересчитано значение магнитуды  $MS=5.6$ , согласно (9), по значениям амплитуд и периодов, указанных в бюллетенях четырёх сейсмических станций.

Непосредственно в пределах архипелага Северная Земля было зарегистрировано только три землетрясения с унифицированными магнитудами  $M$  от 3.5 до 4.3. Только для землетрясения 7 августа 1978 г., произошедшего в  $13^{\circ}35'$ , была вычислена глубина очага, равная 10 км. Для остальных землетрясений принималось минимально возможное значение глубины в зависимости от их магнитуды, согласно (12).

Было выполнено сравнение параметров линеаментно-доменно-фокальных (ЛДФ) моделей карт ОСР-97 и ОСР-2016 с инструментальными данными за период с 1908 по 2020 г. из созданного каталога (Рис. 12). На основе результатов сравнения формулировались определённые выводы для каждой из ЛДФ-модели. Конфигурация, значения максимально возможных магнитуд и глубина доменов в ЛДФ-моделях не всегда соответствуют инструментальным данным и требуется их корректировка. Поэтому на основе полученных выводов были сформулированы

рекомендации по изменению границ доменов, значений глубин доменов и значений максимальных магнитуд, представленные в таблице 3.



**Рис. 12.** Фрагмент ЛДФ-модели карты ОСР-97 и эпицентры землетрясений с эллипсами ошибок из созданного нового уточнённого и унифицированного каталога землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 г.

Таблица 3. Выводы и рекомендации, сформулированные на основе сравнения параметров ЛДФ-моделей карт ОСР-97 и ОСР-2016 с инструментальными данными из созданного нового каталога землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 г.

ЛДФ-модель карты 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 аббиссальной равнины, не моделью учитываются.	1. Расширить ЛДФ-модель за пределы бровки континентального склона, чтобы учесть сейсмичность в устьевых зонах желобов, основании континентального склона и аббиссальной 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	2. Изменить конфигурацию и увеличить площадь домена № 7RUD0065 в районе устья желоба Франц-Виктория, характеризующегося $M_{\max}=6.5$ .

время находится в районе домена № 7RUD0006 с максимальной магнитудой 5.0.	
3. Эпицентр землетрясения 2 июня 1928 г. с $M=4.7$ после процедуры уточнения смесился к устью желоба Святой Анны. Значение магнитуды землетрясения незначительно превышает значение максимальной магнитуды домена № 7RUD0229 $M=4.5$ , располагающегося в районе желоба.	3. Увеличить 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 для доменов №№ 7RUD0094, 7RUD0170 и 7RUD0188, 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 $M_{\max}=5.5$ для доменов №№ 7RUD0298 и 7RUD0333.	5. Возможно, необходимо понизить значения $M_{\max}$ для доменов №№ 7RUD0298 и 7RUD0333 у архипелага Северная Земля с 5.5 до 5.0.
6. Для домена № 7RUD0245, располагающегося на шельфе Карского моря у побережья п-ва Таймыр, также выявлено незначительное превышение магнитуды единственного землетрясения $M=4.7$ по сравнению с $M_{\max}=4.5$ .	6. Необходимо увеличить значение $M_{\max}$ с 4.5 до 5.0 для домена № 7RUD0245, располагающегося на шельфе Карского моря у побережья п-ва Таймыр.
<b>ЛДФ-модель карты ОСР-2016</b>	
<b>Выводы</b>	<b>Рекомендации</b>
1. ЛДФ-модель ограничивается бровкой континентального шельфа, поэтому большое количество землетрясений, происходящих непосредственно в устьевых зонах желобов, у основания континентального склона и аббисальной равнине, моделью не учитываются.	1. Расширить ЛДФ-модель за пределы бровки континентального склона, чтобы учесть сейсмичность в устьевых зонах желобов, 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 в районе устья желоба Франц-Виктория с $M_{\max}=6.5$ .
3. 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 5.0.

#### **Выводы главы 4**

В ходе многолетних исследований по сведению, уточнению и унификации основных параметров, зарегистрированных в пределах западного сектора Российской Арктики землетрясений, и с применением совокупности решений, описанной в главе 2, создан новый уточнённый и унифицированный каталог землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 г.

Созданный каталог отражает зоны повышенной сейсмичности в районе желобов Франц-Виктория и Св. Анны, о. Белый, архипелагов Новая Земля и Северная Земля и позволил сформулировать рекомендации по изменению границ, значений максимально возможных магнитуд и глубин доменов ЛДФ-моделей карт ОСР-97 и ОСР-2016 для данного региона. Полученные в главе результаты являются частью доказательства третьего защищаемого положения.

## **Глава 5. Современная сейсмичность хребта Гаккеля**

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

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 (СОХ) и имеет кайнозойский возраст.

Землетрясения в пределах СОХ отражают активные магматические и тектонические процессы, формирующие новую океаническую кору. При этом, активные процессы хребтов с ультрамедленным спредингом, со скоростями спрединга менее 20 мм/год, к которым относится хребет Гаккеля в Северном Ледовитом океане и юго-западный Индийский хребет 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. 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; Avetisov, 1996; 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 развитию стационарных сейсмических наблюдений на арктических архипелагах Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Северная Земля появилась возможность регистрировать 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  $7^{\circ}$  з.д. до  $80^{\circ}$  в.д. в период с 2012 по 2020 г. и от  $80^{\circ}$  в.д. до  $115^{\circ}$  в.д. с декабря 2016 по 2022 г. на основе данных сейсмических станций Архангельской сети (код сети АН, DOI: <https://doi.org/10.7914/SN/АН>) и с применением совокупности решений, описанной в главе 2.

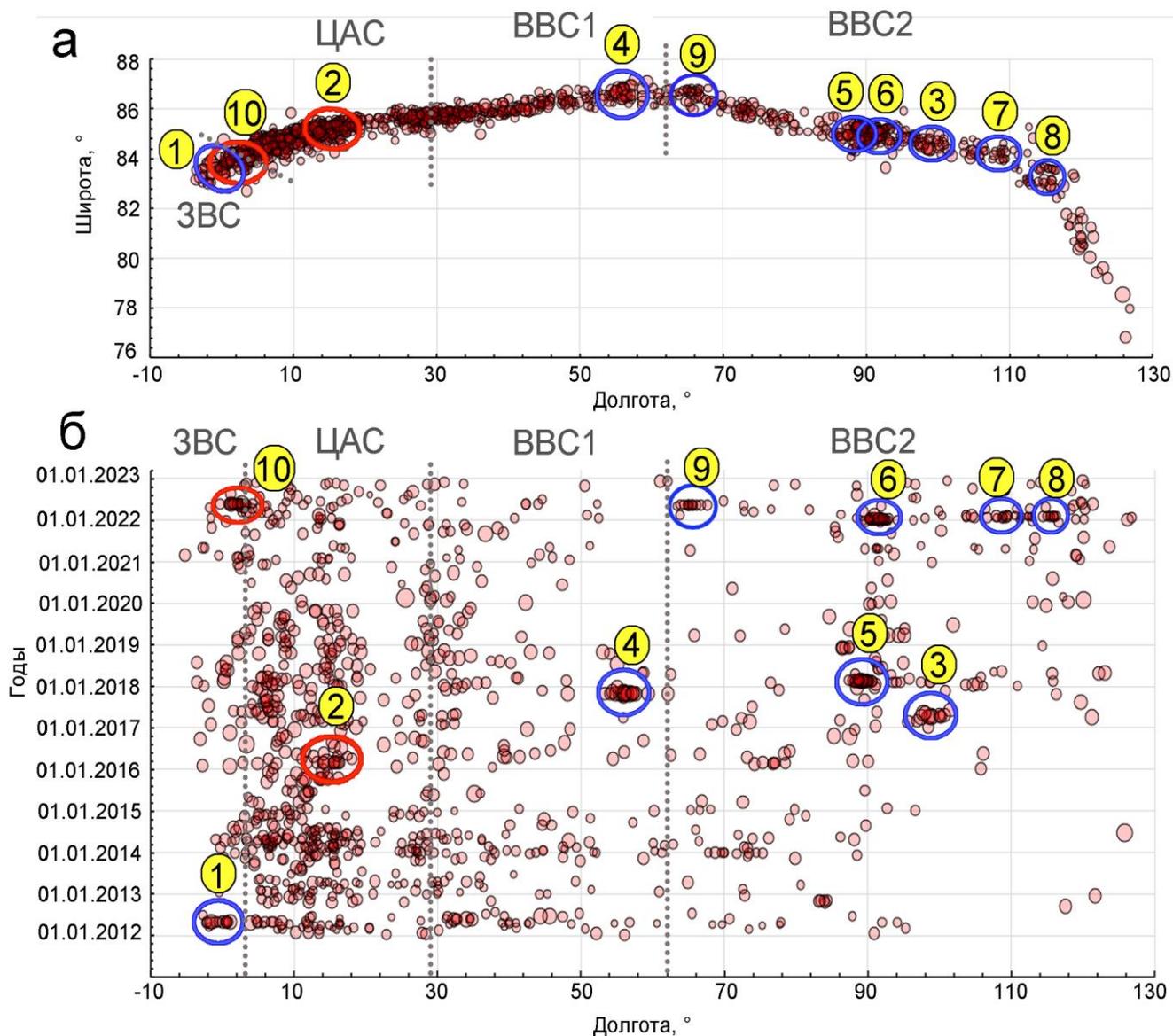
За период с 2012 по 2022 г. в пределах хребта Гаккеля арктическими сейсмическими станциями сети АН было зарегистрировано 1225 землетрясений с магнитудами  $M_L$  от 2.0 до 5.2 (Рис. 13). Значения представительной магнитуды  $M_{LC}$  рассчитывались методом GFT (Goodness-of-Fit test) [Wiemer, Wyss, 2000] отдельно для каждого сегмента – ЗВС, ЦАС и восточно-вулканического сегмента (ВВС). Дополнительно для ВВС значения  $M_{LC}$  вычислялись отдельно для разных временных периодов: с 2012 по 2016 г. и с 2017 по 2022 г. и для разных участков сегмента: от  $30^{\circ}$  в.д. до  $62^{\circ}$  в.д. и от  $62^{\circ}$  в.д. до  $130^{\circ}$  в.д. Результаты расчетов показали, что землетрясения регистрировались с представительными магнитудами от 2.5 до 3.3 в зависимости от участков хребта и периода времени. На основе этих данных был составлен каталог представительных землетрясений хребта Гаккеля.

Эпицентры землетрясений распределены вдоль хребта неравномерно в пространстве. Наибольшее число эпицентров приурочено к району хребта, ограниченному координатами от  $1.5^{\circ}$  в.д. до  $19.0^{\circ}$  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  $26^{\circ}$  в.д.) землетрясений регистрируется мало. И только восточнее  $26^{\circ}$  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  $m_b > 4.4$ ) за весь период наблюдений [Engen et al., 2003] приуроченность их эпицентров к району от  $1.5^{\circ}$  в.д. до  $19.0^{\circ}$  в.д. не выявляется. В пределах ЗВС землетрясений было зарегистрировано меньше, чем в ЦАС. Можно выделить район, ограниченный координатами от  $5^{\circ}$  з.д. до  $3^{\circ}$  з.д., к которому приурочена большая часть зарегистрированных в ЗВС землетрясений.

С 2016 г. появилась техническая возможность регистрировать низкомагнитудные землетрясения для фрагмента хребта восточнее  $80^{\circ}$  в.д. Большинство зарегистрированных эпицентров землетрясений приурочено к району, ограниченному координатами от  $86^{\circ}$  в.д. до  $96^{\circ}$  в.д. В этой части хребта

располагается только два вулканических центра: в районе  $85^{\circ}$  в.д., в котором произошло крупное подводное извержение в 1999 г. [Müller, Jokat, 2000; Korger, 2013], и в районе  $93^{\circ}$  в.д.



**Рис. 13.** Распределение землетрясений в пределах хребта Гаккеля в пространстве (а) и во времени (б)

Овалами синего цвета выделены рои землетрясений, овалами красного цвета – афтершоковые последовательности. Цифрами указаны номера групп землетрясений

Землетрясения в пределах хребта Гаккеля регистрировались неравномерно во времени (Рис. 13). В общем потоке сейсмических событий наблюдаются периоды активизации сейсмичности и периоды затиший по времени, а также скопления и группы землетрясений, локализующиеся в определенном ареале пространства. Некоторые районы характеризуются отсутствием землетрясений в определённые периоды времени. Например, район с  $48^{\circ}$  в.д. по  $63^{\circ}$  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; Мурзоев, 1992; Frohlich, Davis, 1990]. Ограничением применения стандартных методов в случае хребта Гаккеля является немногочисленность и неполнота имеющихся для этого региона в каталогах данных и низкий (ниже уровня представительной магнитуды) энергетический уровень некоторых роев землетрясений. В настоящем же исследовании был применён алгоритм одиночных связей по [Frohlich, Davis, 1990].

Из общего каталога землетрясений, зарегистрированных 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. 13). Один из восьми роев располагается в пределах ЗВС, остальные – в ВВС. При этом в ЦАС 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  $93^\circ$  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 вулcano-тектонических процессов в пределах арктического ультрамедленного хребта.

### ***Выводы главы 5***

В XXI в. благодаря развитию инструментальных наблюдений на арктических архипелагах Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Северная Земля появилась возможность регистрировать низкомагнитудные землетрясения в пределах срединно-океанического хребта Гаккеля на региональных расстояниях. На основе данных многолетних стационарных наблюдений Архангельской сейсмической сети (код сети АН) и с применением предложенной совокупности решений выявлены пространственно-временные закономерности проявления современной слабой сейсмичности и роевых последовательностей в пределах хребта. Данные закономерности характеризуют особенности проявления вулcano-тектонических процессов в пределах хребта Гаккеля с ультрамедленным спредингом. Полученные в главе результаты являются доказательством четвертого защищаемого положения.

### **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 г. на основе объединения каталогов, бюллетеней и, частично, исходных данных всех региональных сейсмических сетей, функционирующих на севере ВЕП. Исследование было проведено с использованием совокупности 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.

Благодаря развитию в XXI в. на севере ВЕП региональных отечественных и зарубежных сейсмических сетей, появились 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 г., сводные бюллетени и на их основе произвести перерасчет параметров гипоцентров с использованием единой скоростной модели и единого алгоритма расчета.

Был составлен предварительный каталог землетрясений для севера ВЕП за период с 2005 по 2018 г. В предварительном каталоге содержатся землетрясения, зарегистрированные не менее четырьмя 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.

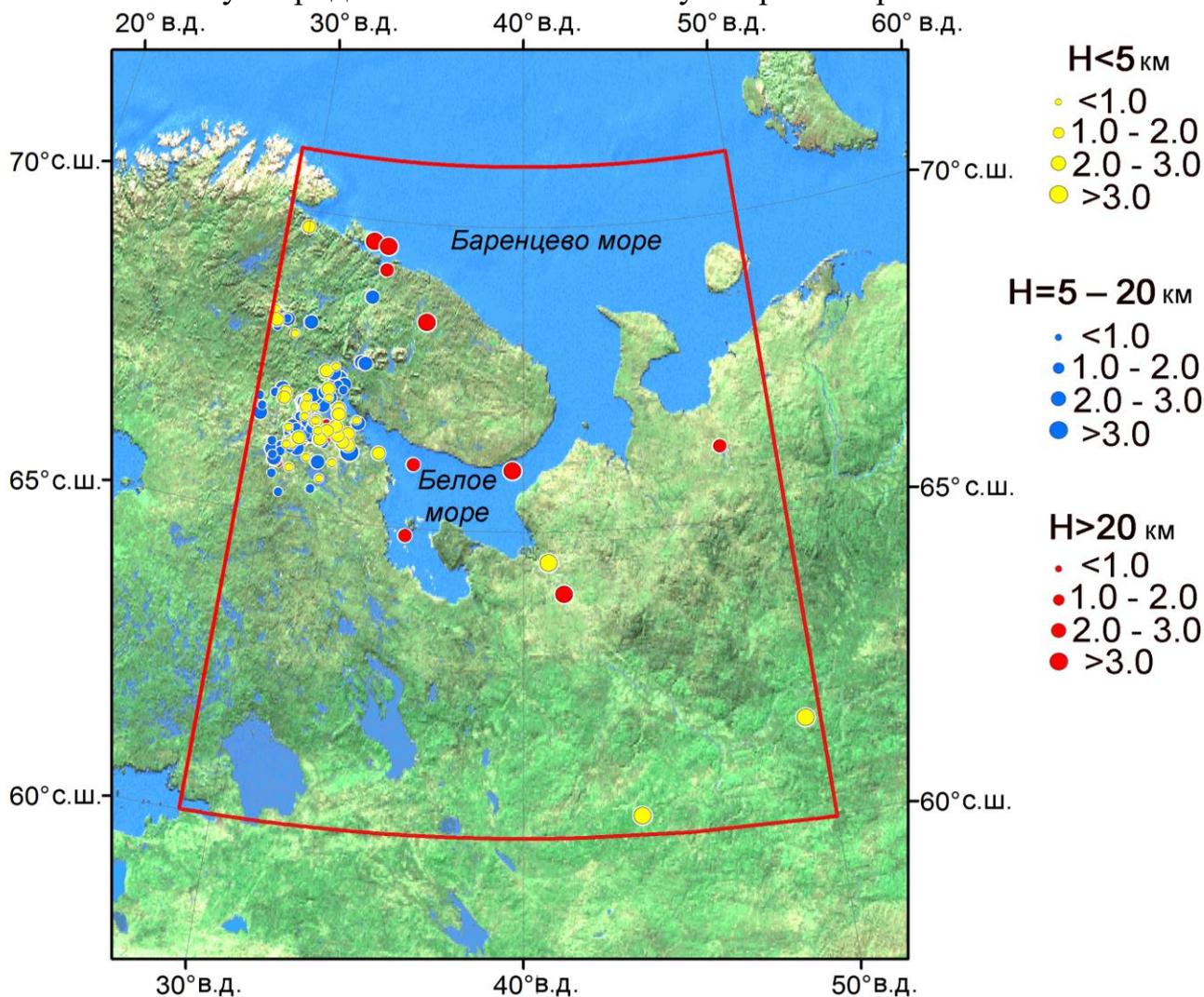
Для каждого землетрясения из предварительного каталога была проведена проверка его тектонической природы с помощью критериев, разработанных сотрудниками Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН [Asming, Kremenetskaya, 2002; Kremenetskaya et al., 2002; Ringdal et al., 2002] и на основе анализа данных инфразвуковой группы «Апатиты» [Кольский Филиал..., 2020]. Однако для части сейсмических событий не удалось провести дополнительную проверку, в основном, из-за низкого соотношения сигнал/шум на записи сейсмической станции. 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 указанные 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 г. в районе исследований было зарегистрировано 125 землетрясений с магнитудой  $ML(HE)$  от 0.1 до 3.0 (Рис. 14). При этом только 15 землетрясений имели  $ML$  выше 2.0. Представительными в каталоге являются землетрясения, начиная с магнитуды 1.3 (Рис. 15). 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].

Северо-запад ВЕП характеризуется самой высокой сейсмической активностью, а именно повышенная сейсмическая активность характерна для западной части Беломорского бассейна. Эпицентры приурочены к Кандалакшской и Куусамо-Порьегубской сейсмогенерирующим зонам, идентифицированным ранее по инструментальным данным [Баранов и др., 2007].

В восточной части Беломорского региона зарегистрировано два землетрясения в Беломорско-Двинском районе в 2005 и 2013 г. 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 г. и 1935 г. [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.



**Рис. 14.** Карта эпицентров землетрясений из созданного уточненного каталога по северу ВЕП за период с 2005 по 2018 г. с указанием магнитуды и глубины  
Линия ограничивает изучаемую область

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 регистрировались, 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 работ [Bungum, Lindholm, 1997; Ассиновская, 2004], авторы которых 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.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Создана совокупность решений, направленная на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений первой половины XX в., включающая в себя: сводный электронный архив бюллетеней сейсмических станций; новый метод вероятностной локации раннеинструментальных землетрясений; современный алгоритм локации, реализованный в программе NAS (New Association System) и глобальную скоростную модель *ak135*.

2. Создана совокупность решений, направленная на повышение достоверности определения основных параметров современных землетрясений западного сектора Российской Арктики, включающая в себя: новые и апробированные региональные одномерные скоростные модели; комбинированную скоростную модель, состоящую из 11 региональных моделей; уточненную шкалу локальной магнитуды *ML* и корреляционные связи между магнитудами разных типов, вычисленными в различных сейсмологических центрах; современный алгоритм локации, реализованный в программе NAS (New Association System) и интеграцию цифровых данных отечественных и зарубежных сейсмических станций.

3. Обобщены сведения о землетрясениях Арктики, произошедших в начале XX в., и проведено уточнение параметров их очагов. Создан уточнённый каталог землетрясений с параметрами очагов для большей части рассмотренных землетрясений, существенно отличающимися 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 в. и не упоминаются в более поздних работах и каталогах.

4. Создан новый уточнённый и унифицированный каталог землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 г., 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 доменов ЛДФ-моделей карт ОСР-97 и ОСР-2016 для данного региона.

5. Впервые по данным многолетних стационарных сейсмических наблюдений выявлены пространственно-временные закономерности проявления современной слабой сейсмичности и роевых последовательностей в пределах срединно-океанического хребта Гаккеля, характеризующие особенности проявления вулcano-тектонических процессов. 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. При этом,

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.

б. 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.
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. – Т. 15. – № 1. – 0737.  
*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 Gakkel Ridge in the Arctic // Geodynamics & Tectonophysics. – 2024. – V. 15 – № 1. – 0737. DOI: 10.5800/GT-2024-15-1-0737
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.
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., Mikhaylova 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. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Конечная Я.В., Асминг В.Э., Dulentsova L.G., Evtugina 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. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Антоновская Г.Н., Асминг В.Э., Gabsatarova I.P., Dyagilev R.A., Shakhova E.V., Evtugina 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., **Морозов А.Н.** 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. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Dulentsova L.G., Asming V.E., Evtugina 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](https://doi.org/10.1007/s10950-020-09972-x)
14. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Конечная Я.В., Zueva I.A., Asming V.E., Noskova N.N., Sharov N.V., Assinovskaya B.A., Panas N.M., Evtugina Z.A. Recent seismicity in northern European Russia // *Journal of Seismology*. – 2020. – V. 24. – P. 37-53. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09883-6>
15. Noskova N.N., **Морозов А.Н.**, 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](https://doi.org/10.15372/RGG2019165)
16. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В., Шахова Е.В., Конечная Я.В., Асминг В.Э., Антоновская Г.Н., Evtugina 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. **Морозов А.Н.**, 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. **Морозов А.Н.**, 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](https://doi.org/10.1134/S1069351318020143)
21. **Морозов А.Н.**, 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1134/S0742046317020051)
23. **Морозов А.Н.**, 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](https://doi.org/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. 52-66.  
*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](https://doi.org/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. **Морозов А.Н.**, 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](https://doi.org/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. **Морозов А.Н.**, 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: ИФЗ РАН, 2024. – 240 с. ISBN 978-5-91-682071-3.

#### 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. **Morozov A.**, Vaganova N. Earthquake catalog (refined and unified) of the western sector of the Russian Arctic for the period from 1908 to 2020 // ISC Seismological Dataset Repository. – 2024. DOI: 10.31905/B1KW6G88
2. Асминг В.Э., **Морозов А.Н.** ProLom. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617379 от 07 апреля 2023 г.
3. **Морозов А.Н.**, Ваганова Н.В. Сводный уточнённый и унифицированный каталог землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 г. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023620419 от 31 января 2023 г.
4. **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
5. 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 22.02.2024 г.

Формат 64×84/16. Объем 2,8 усл. печ. л.

Тираж 120 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