



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**Федерального бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук
на диссертационную работу Морозова Алексея Николаевича
«Сейсмичность западного сектора Российской Арктики и прилегающих территорий за инструментальный период наблюдений»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.6.9. «Геофизика»**

Диссертационная работа Морозова А.Н. посвящена развитию методов оценки параметров произошедших землетрясений и применению их для Арктического региона. В частности, соискателем предложены совокупности решений, направленные на повышение достоверности оценки основных параметров землетрясений первой половины XX в. и современных землетрясений западного сектора Российской Арктики. На основе применения данных совокупностей соискателем созданы уточненные и унифицированные каталоги землетрясений Арктики за период с 1904 по 1920 г. и западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 г., а также выявлены пространственно-временные закономерности проявления современной слабой сейсмичности в пределах срединно-океанического хребта Гаккеля.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 380 наименований, в том числе 233 на иностранном языке и 56 за последние пять лет, и трёх приложений. В приложениях приведены сводные бюллетени и каталоги землетрясений, полученные при выполнении диссертационного исследования. Работа изложена на 286 страницах машинописного текста и содержит 71 рисунок и 35 таблиц.

Актуальность исследования

В основе исследований по сейсмической опасности любой территории лежит каталог землетрясений, по данным которого вычисляются параметры сейсмического режима. Для Арктического региона информация об исторических и палео- землетрясениях

практически недоступна, поэтому большую роль играет достоверность параметров очагов землетрясений, зарегистрированных в течение всего инструментального периода. Однако в течение всего XX в. территория Арктики была крайне неравномерно и слабо охвачена стационарными сейсмическими наблюдениями из-за сложных климатических и географических условий, а также в силу исторических и экономических причин. Особенности развития инструментальных наблюдений напрямую влияли на сейсмологическую изученность арктических территорий. При этом, 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 развитию методов оценки параметров произошедших землетрясений и применению их для Арктического региона.

Последние годы характеризуются повышенным интересом ряда стран, в том числе и Российской Федерации, к арктическим месторождениям углеводородов. Однако освоение шельфовых месторождений затруднено как из-за технической сложности их промышленной разработки и создания инфраструктуры, так и из-за высоких требований к экологической безопасности. Поэтому, актуальными являются исследования по оценке возможных природно-техногенных рисков и обеспечению безопасности функционирования соответствующих производств, т.к. стоимость ликвидации последствий экологических катастроф в условиях Арктики на порядок превышает стоимость аналогичных работ в средних широтах Земли.

В связи с вышеизложенным диссертация Морозова А.Н. «Сейсмичность западного сектора Российской Арктики и прилегающих территорий за инструментальный период наблюдений» несомненно является актуальной.

Цель и задачи исследования

Цель, которую поставил в своей работе соискатель, заключалась в разработке совокупности решений, направленной на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений (гипоцентр, магнитуда) в западном секторе Российской Арктики и проведении на её основе исследований по созданию уточнённых и унифицированных каталогов землетрясений за весь инструментальный период наблюдений, в том числе для территорий, ранее недоступных для детальных сейсмических наблюдений.

В сейсмологии распространены исследования по уточнению параметров очагов ранее произошедших землетрясений. Как правило, уточнение происходит при совершенствовании методических подходов к оценке параметров гипоцентров и выделившейся энергии землетрясений, с привлечением дополнительных инструментальных данных, новых и уточнённых региональных и глобальных скоростных моделей. Поэтому сформулированная в диссертационной работе цель полностью соответствует описанной тенденции в сейсмологии по получению новых и уточнённых сведений о сейсмическом режиме определённых территорий.

Для достижения поставленной цели соискателем были проведены следующие исследования:

1. разработка совокупности решений, направленной на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений первой половины XX в. и современных землетрясений западного сектора Российской Арктики.
2. Обобщение сведений о зарегистрированных за первые десятилетия XX в. сильных арктических землетрясений и переопределение основных параметров их очагов.
3. Создание нового сводного уточнённого и унифицированного каталога землетрясений западного сектора Российской Арктики за инструментальный период.
4. Выявление пространственно-временных и энергетических особенностей 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. Создание сводного уточненного каталога современных землетрясений приарктических территорий севера Восточно-Европейской платформы на основе объединения данных каталогов, бюллетеней и, частично, исходных данных всех региональных сейсмических сетей, функционирующих на севере платформы.

Проведение описанных выше исследований позволило соискателю достичь поставленную в диссертации цель и получить новые и практически значимые результаты, связанные с развитием методов оценки параметров произошедших землетрясений и применением их для уточнения сведений о сейсмическом режиме арктических территорий.

Значимость и практическая ценность полученных результатов. Рекомендации по использованию.

В данном разделе рассмотрены главные результаты, полученные соискателем в диссертационной работе и проанализирована их практическая ценность. В конце раздела высказаны рекомендации по их использованию.

1. Соискателем предложена 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*. Данный результат входит в первое защищаемое положение.

Полученный результат направлен на развитие методов оценки параметров ранее произошедших землетрясений. Разработанный метод вероятностной локации раннеинструментальных землетрясений позволяет проводить локацию землетрясений при небольшом количестве макросейсмических сведений и инструментальных данных. Данный метод может быть применим наиболее эффективно в период становления инструментальных сейсмических наблюдений для исследуемой территории. А также актуален для территорий, которые характеризуются умеренной сейсмичностью, однако не обладающие 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.

Созданный электронный архив бюллетеней сейсмических станций первой половины XX в. позволяет проводить исследования по уточнению основных параметров очагов ранее зарегистрированных землетрясений на основе наиболее полных наборов инструментальных данных. В некоторых случаях позволяет оценивать параметры очагов тех землетрясений, для которых ещё совсем недавно параметры оценивались только по макросейсмическим данным.

2. С целью повышения достоверности определения основных параметров современных землетрясений западного сектора Российской Арктики соискателем предложена совокупность решений, 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. Представленный результат входит во второе защищаемое положение.

Данный результат также направлен на развитие методов оценки параметров землетрясений, но зарегистрированных в западной части Евразийской Арктики. Вычисленные новые региональные одномерные скоростные модели и созданная комбинированная скоростная модель Евразийской Арктики, уточнённая шкала локальной магнитуды ML позволяют повысить достоверность локации и магнитудных оценок землетрясений в западном секторе Российской Арктики и на прилегающих территориях. А выявленные соотношения между магнитудами разных типов, вычисленные в отечественных и зарубежных региональных сейсмологических центрах, позволяют унифицировать магнитуды при создании сводных каталогов землетрясений для оценки сейсмической опасности арктических территорий.

Следующие результаты диссертационной работы являются реализацией созданных соискателем совокупностей для решения конкретных практических задач.

3. Соискателем из разных источников были обобщены данные о землетрясениях, зарегистрированных в Арктике за период с 1904 по 1920 г., и проведено уточнение их основных параметров (гипоцентр, магнитуда) с использованием предложенной совокупности решений для землетрясений первой половины XX в. Соискателем создан сводный унифицированный каталог землетрясений Арктики за период с 1904 по 1920 г., который содержит уточненные параметры для 18 из 25 зарегистрированных землетрясений. Для оставшихся землетрясений в каталоге указаны причины, по которым процедура уточнения не проводилась.

Созданный соискателем уточнённый каталог землетрясений Арктики за период с 1904 по 1920 гг. содержит «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.

Представленные в созданном каталоге землетрясения, в том числе «забытые» сильные землетрясения, зарегистрированные в Арктике в начале XX в., имеют большое значение как для понимания общих закономерностей сейсмического процесса, так и для оценки сейсмической опасности арктических территорий. В частности, землетрясение 13.04.1912 г. с магнитудой $MS=5.1$, эпицентр которого по ряду источников приурочен к архипелагу Северная Земля и которое до сих пор оказывает большое влияние на оценку сейсмической опасности региона, после процедуры уточнения оказалось приуроченным к одному из главных сейсмоактивных районов Арктики – срединно-океаническому хребту

Гаккеля. Исходя из этого, оценка сейсмической опасности района архипелага может быть пересмотрена.

4. На основе результатов многолетних исследований по уточнению и унификации основных параметров зарегистрированных в пределах западного сектора Российской Арктики землетрясений соискателем создан единый уточненный и унифицированный каталог арктических землетрясений за период с 1908 по 2020 г. Каталог, в том числе, содержит данные о современной сейсмичности районов, ранее недоступных для детального сейсмического мониторинга, и отражает зоны повышенной сейсмичности в районе желобов Франц-Виктория и Св. Анны, о. Белый, архипелагов Новая Земля и Северная Земля. При этом шельф Баренцева и Карского морей характеризуется редкой и рассеянной сейсмичностью.

Значимость данного результата подтверждается возможностью проведения сравнения параметров линеаментно-доменно-фокальных (ЛДФ) моделей карт общего сейсмического районирования ОСР-97 и ОСР-2016 и формулировки рекомендаций к их изменению. В частности, соискателем было показано, что конфигурация, значения максимально возможных магнитуд и глубины доменов ЛДФ-моделей карт ОСР-97 и -2016 не всегда соответствуют инструментальным данным и требуется их корректировка.

Созданные каталоги землетрясений за период с 1904 по 1920 г. для всей Арктики и за период с 1908 по 2020 г. для западного сектора Российской Арктики входят в третье защищаемое положение.

5. В диссертации проведён анализ слабой сейсмичности одной из главных сейсмоактивных зон Арктики – срединно-океанического хребта Гаккеля. Применение предложенной соискателем совокупности решений позволило впервые на основе данных многолетних стационарных наблюдений за период с 2012 по 2022 г. составить представление о пространственно-временных закономерностях проявления слабой сейсмичности в пределах хребта Гаккеля.

На основе выявленных закономерностей соискателем сформулированы особенности проявления вулcano-тектонических процессов в пределах арктического хребта Гаккеля с ультрамедленной скоростью спрединга, относящемуся к слабоизученному типу срединно-океанических хребтов. Полученные результаты, несомненно, позволяют уточнить наши представления о проявлении вулcano-тектонических процессов, протекающих в пределах хребта Гаккеля.

Описанные выше результаты диссертационного исследования Морозова А.Н. нашли своё отражение в 28 статьях, опубликованных 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. Соискателем в соавторстве создано одно учебно-методическое пособие, получено три свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и базы данных, а также в Международном сейсмологическом центре (International Seismological Centre) зарегистрированы три базы данных в виде каталогов арктических землетрясений.

Таким образом, описанные в диссертации результаты являются новыми и имеют практическую значимость и могут служить в дальнейшем основой для исследований, связанных с оценкой потенциальных природно-техногенных рисков и сейсмической опасности арктических и прилегающих к ним территорий, уточнением параметров их сейсмического режима. Они также могут быть применены для решения задач обеспечения безопасной эксплуатации промышленных систем и объектов при освоении крупных месторождений в западном секторе Российской Арктики.

На основе полученных соискателем результатов можно сформулировать следующие конкретные рекомендации по их применению:

1. Применить предложенную соискателем совокупность решений, направленную на повышение достоверности определения основных параметров современных землетрясений западного сектора Российской Арктики, при составлении сводных каталогов по региону «Арктика» в ежегодниках «Землетрясения России» и «Землетрясения Северной Евразии» (Издатель ФИЦ ЕГС РАН).
2. Сформулировать рекомендации по изменению параметров ЛДФ-моделей карт общего сейсмического районирования, а также созданных карт ВОЗ (возможных очагов землетрясений) для всей территории Российской Арктики.
3. Не ограничивать применение созданного вероятностного метода локации землетрясений на основе совместного анализа их макросейсмических и инструментальных данных только приарктическими территориями. Например, в Центральной Азии с 1906 г. функционировала сейсмическая станция «Ташкент» (код TAS) и значительный период времени она оставалась единственной в регионе. В этот период параметры землетрясений определялись, преимущественно, по макросейсмическим сведениям.
4. В созданном каталоге землетрясений Арктики за период с 1904 по 1920 г. для семи землетрясений не была проведена процедура уточнения, т.к. соискателю не удалось обнаружить в бюллетенях времен вступлений сейсмических фаз более чем на трех сейсмических станциях. Необходимо продолжить исследования по поиску времён вступлений этих землетрясений, но с использованием сейсмограмм сейсмических станций, а не их бюллетеней. Часть таких

землетрясений относится к региону Российской Арктики и могут, потенциально, внести вклад в оценку сейсмической опасности арктических территорий.

5. Необходимо создать полноценную базу данных из созданного соискателем сводного электронного архива, содержащего бюллетени сейсмических станций, функционировавших в первой половине XX в., сведения об их аппаратуре, а также сводные бюллетени и каталоги землетрясений начала XX в.

Замечания к диссертационной работе

Вместе с тем работа не лишена некоторых недочётов и упущений:

1. В главе 2 описан разработанный новый метод вероятностной локации землетрясений на основе совместного анализа их макросейсмических и инструментальных данных. Работоспособность метода была проверена на реальном землетрясении, произошедшем 20.05.1967 г. в Кандалакшском заливе Белого моря с $m_b(\text{ISC})=4.6$. Однако в главе не отражены исследования по оценке применимости метода в зависимости от удалённости сейсмических станций, количества макросейсмических сведений («пунктов-баллов»), азимутального охвата очага «пунктами-баллами» и диапазона вариаций значений интенсивности. Подобные исследования могли бы выявить минимальные (граничные) условия применимости метода.
2. В методе вероятностной локации при разбиении географической области на ячейки изначально предполагается равная вероятность нахождения эпицентра во всех ячейках. Возможно, для улучшения локации стоит использовать разные функции распределения исходной вероятности в зависимости от предполагаемой области очага, распределения «пунктов-баллов» и т.д.
3. В главе 2 для тестирования новых и ранее созданных региональных моделей для западного сектора Российской Арктики применялись подземные ядерные взрывы, произведенные на архипелаге Новая Земля и на севере Европейской части России. Насколько эффективны будут такие модели для региональных землетрясений, очаг которых располагается на определённой глубине.
4. В главе 2 соискателем предложена совокупность решений, направленная на повышение достоверности определения основных параметров землетрясений первой половины XX в. В тексте диссертации не указано, является ли данная совокупность межрегиональной, т.е. можно ли использовать её для землетрясений из других регионов Земли.

5. В главе 3 для каждого землетрясения производился поиск времен вступлений в бюллетенях сейсмических станций. Можно ли было использовать исходные сейсмограммы сейсмических станций для выявления времён вступлений сейсмических фаз, особенно для тех землетрясений, по которым было собрано недостаточное количество вступлений из бюллетеней?
6. В главе 4 соискателем создан новый уточнённый и унифицированный каталог землетрясений западного сектора Российской Арктики за период с 1908 по 2020 г. Однако из текста не совсем ясно, применялись ли при создании сводного каталога специальные алгоритмы для очистки от дублей, которые возникают при сопоставлении данных из разных источников.
7. В главе 5 на основе данных многолетних стационарных наблюдений Архангельской сейсмической сети (код сети АН) и с применением предложенной соискателем совокупности решений выявлены пространственно-временные закономерности проявления в пределах хребта Гаккеля современной слабой сейсмичности и роевых последовательностей, приуроченные к вулcano-тектоническим процессам. Однако в главе не указано по каким критериям роевые землетрясения приурочены именно к вулcano-тектоническим процессам, протекающим в пределах хребта.
8. В главе 5 для идентификации роев использовался алгоритм одиночных связей («Single-Link Cluster Analysis»), однако не совсем явно указано какой исходный каталог применялся: включал ли каталог все землетрясения или только представительные?

Высказанные замечания не снижают достоинств диссертационного исследования Морозова А.Н.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертация Морозова Алексей Николаевича является законченным научно-исследовательским трудом на актуальную тему, обладающая научной новизной, и выполнена соискателем самостоятельно на высоком научно-техническом уровне. В диссертационной работе решена научная проблема, имеющая важное значение для изучения сейсмических процессов в Арктическом регионе, связанная с развитием методов оценки параметров произошедших землетрясений и применением их для конкретных арктических территорий и временных периодов. Основные результаты диссертации являются новыми и имеют практическую значимость для последующей оценки

потенциальных природно-техногенных рисков и обеспечения безопасной эксплуатации промышленных объектов при освоении крупных нефтегазовых месторождений на арктическом шельфе. Основные положения диссертационного исследования достаточно полно раскрыты в автореферате и публикациях соискателя.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), а её автор А.Н. Морозов достоин присуждения учёной степени доктора технических наук.

Ведущий научный сотрудник
Лаборатории сейсмологических методов
исследования литосферы,
доктор физико-математических наук

Китов Иван Олегович

Ведущий научный сотрудник
Лаборатории сейсмологических методов
исследования литосферы,
кандидат физико-математических наук

Гоев Андрей Георгиевич

Диссертационная работа и отзыв обсуждены на семинаре ИДГ РАН 28 марта 2024 г. Отзыв одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Федеральное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук (сокращенное название ИДГ РАН), адрес: 119334, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, корп. 1.

Подписи сотрудников ИДГ РАН И.О. Китова и А.Г. Гоева заверяю:

Ученый секретарь ИДГ РАН



Д.Н. Локтев