

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу Зуевой Ирины Александровны по теме: «Идентификация сейсмических событий на территории Карелии», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 - «Геофизика»

1. Актуальность темы диссертации

В последние годы в мире значительно возрос интерес к изучению сейсмичности платформ. Это связано с получаемыми результатами в исследовании тектоники платформенных областей инструментальными сейсмическими методами, изучением исторических макросейсмических данных, а также данными о палеосейсмичности. На территориях, которые считались ранее асейсмичными, регистрируются землетрясения с магнитудами вплоть до $M=5.5$, а иногда и выше. Эти сейсмические события представляют собой риск для жилищной и промышленной инфраструктуры, объектов атомной, химической, добывающей отраслей и др.

Например, Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года с $M_w \sim 5$ является прямым подтверждением представлений, лежащих в основе сейсмического районирования современного уровня, о возможности повсеместного проявления слабых и даже умеренных сейсмических событий с редкой повторяемостью. Другой пример – землетрясения с районе Семипалатинского испытательного полигона (1925, 1976, 1996, 1988, 2015 гг.). Кроме того, в последние годы, в связи с антропогенной деятельностью, резко возросло количество техногенных и природно-техногенных землетрясений, во многих странах, в том числе на платформенных территориях. Например, землетрясение в районе в районе Карбасса (Центральный Казахстан), близ г. Караганды 21.06.2014 г ($m_{pva}=5.2$), или 23 августа 2019 года ($m_b=4.7$) в районе Экибастуза.

Однако выявление тектонических землетрясений малой энергии затруднено большим количеством сейсмических сигналов от техногенных событий, главным образом, от карьерных взрывов, обрушений и горных ударов. Для оценки сейсмической опасности и изучения геодинамических процессов необходимо использовать сейсмические каталоги, свободные от техногенных помех и включающих в себя только тектонические землетрясения. Для решения этой задачи необходимо анализировать данные локальных и региональных сейсмических сетей мониторинга, станции должны быть откалиброваны, необходимо создание базы данных с информацией о карьерах, таких как координаты карьера, особенности технологии взрывных работ, средняя и максимальная мощность, основное время проведения взрывов, списки эталонных событий с конкретного карьера и др. Для аналитиков, данных, работающих над созданием сейсмологического бюллетеня необходимо представить ряд дискриминантов, необходимых для однозначной идентификации природы события.

В связи с этим, диссертационная работа актуальна и имеет большую практическую ценность.

2. Степень достоверности результатов

Исследовательская база в виде сейсмических каталогов, базы данных работающих на территории Карелии карьеров, методы обработки, объекты и инструменты исследований, их значимость и научная новизна обоснованы и подтверждаются публикациями и выступлениями на международных конференциях. Выводы диссертационной работы основаны на анализе сравнительно небольшого объема

проанализированной статистической информации по взрывам и землетрясениям, в связи с рассмотрением данных Карельской сети сейсмических станций за непродолжительный период наблюдений 2017-2020 гг., и небольшого количества зарегистрированных сейсмических событий. Тем не менее в работе приводятся результаты расчетов эффективности работы сейсмической сети и моделирования. Достоверность результатов подтверждается применением нескольких различных методов локализации событий, комплексированием методов, сопоставлением полученных результатов с данными международных сейсмологических центров.

3. Научная новизна и значимость работы

В диссертационной работе автор впервые проводит ряд исследований по оценке регистрационных возможностей, а также точности определения кинематических параметров по данным сейсмологического мониторинга техногенных и тектонических событий на территории Карелии по данным Карельской сейсмической сети (КАРСС). Подобрана скоростная модель и мат.обеспечение для локализации, проведен анализ спектральной плотности сейсмического шума. Рассмотрены особенности волновой картины сейсмических событий различной природы, создан альбом эталонных записей взрывов для каждого карьера. Разработана методика сейсмического распознавания взрывов и землетрясений, с целью создания заключительного каталога тектонических землетрясений. Сейсмическая сеть КАРСС имеет большое значение в мониторинге региональной сейсмичности, как Карелии, так и всей ВЕП.

4. Публикации по теме диссертационной работы

Соискателем было опубликовано 30 печатных работ по теме диссертационной работы. Из них 4 статьи (Wos, Scopus), раздел монографии, 7 статей из перечня, установленного ВАК, а также материалы конференций.

5. Структура и содержание диссертации

Структура и оформление диссертации соответствует рекомендованному ВАК ГОСТу 7.011.2011 “Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления”.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 166 наименований. Работа изложена на 152 страницах текста, имеет 73 рисунка, 16 таблиц и 4 приложения.

Во **введении** раскрыты актуальность темы, цель и задачи исследований, защищаемые положения, новизна, практическая ценность, реализация и апробация работы.

В **первой** главе приведены сведения о геолого-геофизическом строении Республики Карелия, показано, что на ее территории и прилегающих районах можно выделить три геоблока: Карельский кратон, Беломорский складчатый пояс, и Свекофеннская складчатая область. Рассмотрены особенности строения литосферы, описаны зоны возможных тектонических землетрясений, показана важная роль палеосейсмологических исследований для формирования представления о сейсмическом режиме Карелии. Были выделены и детально описаны восемь зон развития локальных сейсмодиформаций: Лпдожская, Онежская, Нюхчинская, Сегозерская, Лехтинская, Калевальская, Паанаярвинская и Беломорская. Показано, что в настоящее время рассматриваемый район характеризуется как слабосейсмичный. Важной особенностью сейсмического режима является

гляциоизостатические компенсационные движения во время активной дегляциации ледникового покрова.

Автор приводит информацию о мониторинге региональной сейсмичности, осуществляемом ФИЦ ЕГС РАН, Института сейсмологии Хельсинки, показывает необходимость непрерывного сейсмического мониторинга территории Карелии станциями региональной сейсмической сети КАРСС, который будет способствовать улучшению качества определения параметров сейсмических событий, таких как время в очаге, координаты, глубина, а также снизится пороговая магнитуда. Следующий этап создания финальной версии каталога является сейсмическое распознавание природы источника. Автор приводит обзор методов идентификации промышленных взрывов и землетрясений, проанализировав различные подходы для определения дискриминантов, автор выбрал для задачи распознавания карьерных взрывов и землетрясений экспериментально аналитические методы (метод локации события, метод отношения максимальных амплитуд продольных и поперечных волн, метод построения спектрограмм, выделение на записи инфразвукового сигнала).

Во **второй** главе автор приводит историю создания и развития сети КАРСС, основные параметры как стационарных сейсмических станций, так и полевой станции. Рассмотрены характеристики установленной аппаратуры и условия установки станций. В настоящее время на четырех стационарных станциях сети КАРСС функционируют трёхкомпонентные широкополосные чувствительные сейсмические станции. Сейсмостанции обеспечивают регистрацию сейсмических событий в широком диапазоне частот от 0.033 до 50 Гц, который позволяет при применении полосовой фильтрации частот регистрировать сейсмические события на локальных, региональных, а также телесеизмических расстояниях.

С целью исследования эффективности сейсмических станций, автор приводит модели спектральной плотности сейсмического шума, сопоставляет их с моделями Петерсона. Показано, что уровень сейсмического шума на станциях Карелии близок к верхнеуровневой модели Петерсона.

В **третьей** главе рассматривается методика обработки сейсмических данных. В настоящее время для определения параметров сейсмических событий используется матобеспечение ELRESS, WSC, HYPO_BUR, HupoGlobal. Различные методы обработки в условиях малого количества станций и небольших магнитуд событий обеспечивает точность сейсмических бюллетеней. Автор разработал алгоритм локализации HupoGlobal, написал программу, протестировал на данных региональной сети, внедрил ее в обработку. Для улучшения качества локализации создается виртуальная сеть наблюдений, в которую помимо станций сети КАРСС входят станции Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН и Пулковской сейсмической сети ФИЦ ЕГС РАН. Расчет локальной магнитуды проводится только на станциях сейсмической сети Карелии.

Протестированы различные одномерные скоростные модели BALTIC, BARENTS и KARELIA. Показано, что при использовании скоростной модели BARENTS наблюдается хорошая точность локализации сейсмических событий для Северо-Западных регионов.

В разделе 3.1 автор приводит результаты оценки эффективности системы сейсмологических наблюдений в рассматриваемом регионе. Для этой задачи использовался метод и программное обеспечение Бурмина В.И. Показано, что невязка в определении координат эпицентров сейсмических событий на территории Карелии в среднем не превышают 10 км, для определения глубины не превышают 5 км. Показано что Карельская сейсмическая сеть в области плотного распределения сейсмических станций регистрирует землетрясения с минимальной магнитудой 1.8, на окраине региона с магнитудой 3.4.

Теоретические оценки разрешающей возможности сети станций были проверены при регистрации эталонных взрывов на территории двух карьеров сетью станций КАРСС, а также сейсмической сетью Финляндии.

В **четвертой** главе описаны разработанная методика и обобщенные результаты многолетнего изучения источников промышленных взрывов в карьерах, зарегистрированных на территории Карелии сетью сейсмических станций. Обосновывается важность проводимых исследований для идентификации регистрируемых событий, особенно для слабосейсмичных районов ВЕП.

Автор провел большую работу по сбору и обобщению данных о технологии буровзрывных работ и параметрах взрывов для карьеров на территории Карелии с размерами взрывных блоков, геометрией рассредоточения и массой взрывчатого вещества – общей и по отдельным взрывным скважинам. Рассмотрена зависимость магнитуд M_L короткозамедленных взрывов от мощности. Показано, что даже для короткозамедленных взрывов с суммарной мощностью $Q=1200$ т, сейсмический эффект очень мал и не превышает $M_L=2.5$. Составлен атлас сейсмограмм эталонных взрывов из каждого карьера, составлены рекомендации о критериям сейсмического распознавания для аналитиков занимающихся обработкой и интерпретацией сейсмологических данных для введения в практику сейсмического мониторинга и создания финального сейсмологического бюллетеня. Автор исследовал особенности волновой картины карьерных взрывов и землетрясений для каждого карьера, определены опорные станции по записям которых идентификация взрывов наиболее эффективна. Рассмотрены спектры и спектральные отношения максимальных амплитуд продольных и поперечных волн для каждого класса сейсмических событий. Показано, что на сейсмических записях карьерных взрывов по станции PTRZ на расстояниях до 60 км регистрируется инфразвуковой сигнал.

Предложен алгоритм идентификации природы источника по станциям сети КАРСС, основанный на комплексе обрабатывающих программ, волновом и спектральном анализе сигналов, регистрации инфразвуковых сигналов, оценке энергетических характеристик и координат очага, выделенных зонах сейсмичности.

В **пятой** главе приводятся результаты сейсмологического мониторинга по данным сети КАРСС за период 2017-2020 гг. За этот период было зарегистрировано более 2000 событий различной природы, большая часть которых – карьерные взрывы. За последние два десятка лет на территории Карелии регистрируются от 1-10 землетрясения в год с магнитудой не более 3.2. Очаги тектонических землетрясений расположены в основном на севере региона: в Лоухском и Калевальском районах. Единичные случаи зарегистрированы в Белом море и в районе г. Костомукша. Установлено, что большинство эпицентров расположены вдоль активных разломов, остальные расположены в районах новейших разрывных нарушений.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы, а также изложены перспективы развития сейсмологических наблюдений в Карелии.

6. Наиболее важные результаты диссертации, имеющие научную значимость и/или оригинальный характер

В результате работы над диссертационной работой была проведена оценка эффективности сейсмического мониторинга сети КАРСС. Проведен ряд работ, направленных на разработку рутинной технологии обработки сейсмических данных для территории Карелии, и созданию сводного каталога сейсмических событий. Подобрано мат.обеспечение, скоростная модель, создан атлас сейсмограмм эталонных карьерных

взрывов, разработаны критерии сейсмического распознавания карьерных взрывов и землетрясений.

Выделены районы тектонической сейсмичности и места проведения взрывных работ, построена карта современной сейсмичности для территории Карелии. Установлено, что тектонические землетрясения регистрируются в Лоуховском и Калевальском районе, а так же зарегистрированы единичные случаи проявления сейсмичности в районе г.Костомукша и Белое море.

Поскольку сеть мониторинга КАРСС новая, все проведенные исследования по оценке первых результатов мониторинга, по интерпретации волновой картины событий различной природы, оценке эффективности сети наблюдения являются новыми, цель, указанная в диссертации достигнута.

7. Соответствие автореферата диссертации

Автореферат полностью соответствует диссертации.

8. Практическая ценность результатов

Исследовательская база в виде сейсмических каталогов, базы данных активных карьеров, атласа эталонных карьерных взрывов, методы обработки, дискриминанты сейсмического распознавания послужат основой для дальнейших исследований, оценки сейсмической опасности, выбора мест для строительства ответственных объектов.

Данные сейсмических бюллетеней используются в региональных и Международных сейсмологических центрах для уточнения параметров сейсмических событий северо-западной части ВЕП и прилегающих территорий.

9. Апробация работы

Материалы диссертации прошли апробацию на международных, всероссийских и молодежных конференциях, опубликованы в рецензируемых журналах.

10. Замечания по диссертации

1. В описании Онежской сейсмогенной структуры (глава 1) сообщается о Петрозаводском землетрясении 01.01.1978 г. с магнитудой около 4. Тем не менее ни в региональных, ни в глобальных сейсмологических каталогах не содержится информации об этом сейсмическом событии. В это время на территории Северной Евразии работало много сейсмических станций, но сейсмические записи или бюллетени для этого землетрясения отсутствуют.

2. В главе 2 приводятся метаданные каждой станции сети КАРСС, при описании аппаратного оснащения не приводится важный параметр – частота оцифровки, который является важной характеристикой станции. На рис. 2.7 приведена амплитудно-частотная характеристика, ось абсцисс имеет неверную размерность, в подписи указано “Частота (Гц)”, а значения оси от -2 до 2.

3. В главе 2 п.2.4 приводятся исследования уровня сейсмического шума по данным сейсмических станций PTRZ, KOS6, PITK, PAAN. На рисунках 2.8-2.11 ось абсцисс так же, как и для рис. 2.7 имеет неверную размерность, в подписи указано “Частота (Гц)”, а значения оси от -2 до 2.

Уровень сейсмического шума согласно графикам, является очень высоким и приближается к верхнеуровневой модели Петерсона, что противоречит данным, приведенным в работе [В. А. Мещерякова, А. А. Герасимова, 2019], где приводятся модели сейсмического шума для тех же станций, однако уровень спектральной плотности

сейсмического шума значительно ниже. Так, по результатам исследований приведенным в статье, для сейсмической станции PTRZ разница составляет более 20 Дб, уровень спектральной плотности сейсмического шума тяготеет к нижнеуровневой модели Петерсона.

Диссертант для расчета спектральной плотности сейсмического шума использовал 5 часов записи, такой интервал времени для построения модели недостаточен, необходимо использовать статистически представительный материал за продолжительный период. Возможно завышенный уровень сейсмического шума связан с сильным ветром, штормом или другим кратковременным явлением, использование данных за длительный период наблюдения позволило бы объективно оценить уровень шума. Либо ошибка связана с неверным учетом аппаратных характеристик.

Для интерпретации полученных характеристик спектральной плотности сейсмического шума необходимо было проанализировать возможные природные и антропогенные источники сейсмического шума, расстояния их до станций.

4. В главе 3 приводится сравнение результатов локализации при помощи использования различного мат.обеспечения, скоростных моделей, сетей мониторинга. В каждом случае автор приводит 1 пример сравнения параметров локализации. Такой подход не является обоснованным, для корректного сравнения необходимо привести статистический анализ параметров за длительный период наблюдения. Наличие большого количества карьеров на территории Карелии способствует созданию базы данных эталонных событий, и отработки методов локализации с корректной оценкой эффективности.

Лишь при сравнении результатов локализации карьерных взрывов, произведенных на месторождении “Чевжавара” и карьеров вблизи г. Костомукша станциями сети КАРСС и Финской сейсмической сетью (HELS) для анализа использовались 10 и 16 событий соответственно.

5. В п.3.6 приводится оценка эффективности сейсмической сети КАРСС, так, согласно рис.3.10 приводится карта распределения минимальных магнитуд землетрясений. Согласно этой карте представительной магнитудой для территории Карелии является $M=3.4$. Оценка, по моему мнению, является завышенной. Автор в заключении приводит вывод, что на территории Карелии сеть КАРСС регистрирует сейсмические события с магнитудой 1 и выше. Два вывода противоречат друг другу. Возможно в формуле 2, которая использовалась для картирования минимальных магнитуд на рис. 3.10 неверно заложены параметры сейсмических приборов.

6. В главе 4 автор приводит результаты изучения сейсмического распознавания промышленных взрывов в карьерах и землетрясений, на территории Карелии. Диссертант создал атлас записей эталонных взрывов на каждом из карьеров. Логично было использовать корреляционный метод идентификации карьерных взрывов с использованием эталонных сейсмограмм. Этот метод давно используется в практике сейсмического распознавания природы источников и хорошо себя зарекомендовал в разных регионах мира.

7. В качестве одного из дискриминантов автор рассматривает отношение максимальных амплитуд продольных и поперечных (A_p/A_s). Для корректного использования этого метода необходимо учитывать структуру поля поглощения S-волн исследуемого района. Автор не приводит эти сведения в диссертации.

Либо необходимо использовать записи взрывов и землетрясений из одного района. Однако в работе используются записи событий для диапазона эпицентральных расстояний 12-365 км, сопоставлять их без коррекции за затухание и поглощение S-волн не корректно.

8. Для сейсмической станции KOS6 приведен график $\lg(A_p/A_s)$, однако на графике приведена неверная легенда, из которой не ясно, какие значения параметра соответствуют взрывам, а какие землетрясениям.

9. В диссертации не приведены примеры других явлений, распространенных в районе добычи полезных ископаемых, например, горных ударов и обрушений.

10. В главе 5 приводится “график повторяемости землетрясений на территории Карелии”, на самом деле это не график повторяемости, а график количества землетрясений для разных диапазонов магнитуд.

11. Заключение

Отмеченные замечания на умаляют достоинств диссертационного исследования. Диссертационная работа Зуевой Ирины Александровны «Идентификация сейсмических событий на территории Карелии», является актуальным, целостным, самостоятельным научным исследованием, отличающимся новизной и имеющим практическую ценность. Диссертация носит прикладной характер, отвечает требованиям, указанным в “Положении о присуждении ученых степеней” (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 в ред. от 20.03.2021, пп. 9, 10, 11, 13, 14) и предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор диссертации Зуева Ирина Александровна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 - «Геофизика».

Соколова Инна

[Handwritten signature]
12.02.2024

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук».

Адрес места работы: 249035, г. Обнинск Калужской обл., пр. Ленина, 189. Тел: +7(484)393-14-05; e-mail: SokolovaIN@gstras.ru; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН).

Я, **Соколова Инна**, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, а также их дальнейшую обработку.

Подпись Соколовой И. заверяю



[Handwritten signature] Е.С. Соколова
Начальник отдела кадров
ФИЦ ЕГС РАН