

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПЗ РАН)

УДК 550.34

Рег. N НИОКТР 124020900029-7

Рег. N ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН

чл.-корр. РАН

_____ П.Н. Шебалин
« ____ » _____ 2024 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА И РЕГИСТРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ
ДАННЫХ В ЦЕЛЯХ ИЗУЧЕНИЯ ОЧАГА И СТРОЕНИЯ СРЕДЫ
(промежуточный, этап 2024 года)

Руководитель НИР
ст. науч. сотр., зав. лаб.,
канд. физ.-мат. наук

_____ А.И. Филиппова
Подпись, дата

Москва 2024

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, ст. науч. сотр., зав. лаб., канд. физ.-мат. наук	_____	А.И. Филиппова (Введение, Заключение, разделы 1.1, 2.3)
Исполнители темы		
гл. науч. сотр., докт. физ.-мат. наук	_____	Р.Г. Новиков (раздел 1.4)
вед. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____	М.Г. Шнирман (раздел 1.5)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____	Е.М. Блантер (раздел 1.5)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____	В.В. Гравиров (разделы 2.1, 2.2)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____	М.С. Елаева (раздел 1.5)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____	К.В. Кислов (разделы 2.1, 2.2)
ст. науч. сотр.	_____	А.В. Ландер (разделы 1.2, 3)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____	А.А. Скоркина (раздел 1.3)
ст. науч. сотр. канд. г.-м. наук	_____	Я.Б. Радзиминович (раздел 1.1)
ст. науч. сотр. канд. тех. наук	_____	А.С. Фомочкина (разделы 1.1, 2.3)
лаборант-иссл.	_____	И.С. Бурлаков (раздел 2.3)
лаборант-иссл.	_____	Ф.Э. Винберг (раздел 2.3)
Нормоконтролер	_____	О.В. Селюцкая

РЕФЕРАТ

Отчет 46 страниц, 19 рисунков, 46 источников, 3 приложения

МЕХАНИЗМ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ; МАГНИТУДА; СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ; РАСПРЕДЕЛЕННОЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ; ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ; МОДЕЛИ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ КРИТИЧНОСТИ; ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ЦУНАМИ.

В 2024 году исследования по теме велись по трем основным направлениям: моделирование очаговых параметров землетрясений и процессов их подготовки; развитие методов сейсмометрии, сбора и систематизации геофизических данных; оценка цунамиопасности побережий Камчатки. В рамках первого направления с использованием различных методик, в том числе разработанных в ИТПЗ РАН, были определены очаговые параметры значимых землетрясений основных сейсмоактивных регионов РФ (Кавказа, Прибайкалья, Камчатки); детально проанализирована сеймотектоническая позиция очагов отдельных сейсмических событий; для Кавказа и Камчатки определены межмагнитудные соотношения; предложены теоретические и численные методы нахождения функции с компактным носителем по абсолютному значению ее преобразования Фурье; проведены теоретические исследования самоорганизующейся критичности и осцилляционных систем. В рамках второго направления особое внимание было уделено новому направлению сейсмометрии – распределенному акустическому зондированию; предложена методика тестирования качества работы систем сбора сейсмологической информации в полевых условиях; проанализирована база данных очагов землетрясений Восточной Арктики. В рамках третьего направления были проведены оценки параметров возможных цунами на побережьях Камчатки: участка побережья Авачинского залива акватории Тихого океана от устья р. Халактырка до оз. Котельного и Октябрьской косы.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	8
1 Очаговые параметры землетрясений и моделирование процессов их подготовки.....	8
1.1 Очаговые параметры землетрясений Прибайкалья и Забайкалья.....	8
1.2 Землетрясения Камчатки и Дальнего Востока России.....	12
1.3 Спектральные характеристики землетрясений и межмагнитудные соотношения.....	14
1.4 Разработка математического аппарата для решения прямых и обратных задач.....	16
1.5 Модели самоорганизующейся критичности и осцилляционные системы.....	18
2 Методы сейсмометрии, сбора и систематизации геофизических данных.....	20
2.1 Применение волоконно-оптических технологий в сейсмометрии.....	20
2.2 Анализ качества работы систем сбора сейсмологической информации в полевых условиях	22
2.3 База данных механизмов очагов землетрясений Восточной Арктики.....	26
3 Оценки параметров возможных цунами.....	28
3.1 Разработка методик и создание случайных синтетических каталогов землетрясений.....	28
3.2 Результаты оценок параметров возможных цунами.....	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	33
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	36
ПРИЛОЖЕНИЯ:	
Приложение А – Публикации по теме НИР, изданные в 2024 г.....	41
Приложение Б – Доклады на конференциях по теме НИР в 2024 г.....	43
Приложение В – Программы по теме НИР, зарегистрированные в 2024 г.....	46

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяются следующие сокращения и обозначения

АЦП	—	аналого-цифровой преобразователь
БТВ	—	Бак-Танг-Визенфельд
зоны ВОЗ	—	зоны возникновения очагов землетрясений
ИЗК СО РАН	—	Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук
ИТПЗ РАН	—	Институт теории прогноза землетрясения и математической геофизики Российской академии наук
ИФЗ РАН	—	Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук
МГУ	—	Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
СОК	—	самоорганизующаяся критичность
ФИЦ ЕГС РАН	—	Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба» Российской академии наук
ЦССИ	—	цифровые системы сбора информации
DAS	—	Distributed Acoustic Sensing
KISS	—	Klychevskoy Investigation – Seismic Structure of an Extraordinary Volcanic System
LSB	—	величина одного младшего бита
NFB	—	число свободных от шумов отсчетов
SFDR	—	динамический диапазон свободный от паразитных составляющих
SMART	—	Science Monitoring and Reliable Telecommunications

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время моделирование очаговых параметров землетрясений, а также процессов их подготовки остается актуальным для сейсмологии. В рамках работ по теме в 2024 году с помощью оригинальных методик, разработанных в ИТПЗ РАН, были получены очаговые параметры ряда знаковых сейсмических событий, произошедших в России в последнее десятилетие и представляющих особый интерес в связи с задачами цунамирайонирования или в силу малоизученности территорий, на которых они произошли. Исследования проводились для основных сейсмоактивных регионов РФ: Кавказа, Прибайкалья, Камчатки. Для землетрясений Прибайкалья и Камчатки выполнен детальный анализ их сеймотектонической позиции. Важно отметить, что полученные нами результаты, касающиеся определений интегральных характеристик очага, описывающих геометрию разрыва и его развитие во времени, представляют интерес для построения корреляционных соотношений между магнитудой, размерами очага и скоростью разрываобразования для относительно слабых землетрясений, так как обычно в мировой практике для этого используются события с $M > 6.0$.

Исследования спектральных параметров землетрясений и межмагнитудных соотношений были выполнены для района Камчатки, включающего в себя Ключевскую группу вулканов, и для Северного Кавказа. В рамках проведенных работ для первого региона впервые для вулканической сейсмичности на территории РФ определены сейсмические моменты и установлены межмагнитудные соотношения для длиннопериодных и высокочастотных землетрясений магнитудного диапазона $M_w = 1-3$. Важным для дальнейшей обработки региональных сейсмических событий Северного Кавказа было исследование, направленное на установление соотношений между различными типами магнитуд.

Принципиальными для моделирования процессов подготовки и возникновения землетрясений (динамики нагружения сейсмоактивного региона) являлись проведенные в отчетный период исследования свойств моделей самоорганизующейся критичности (СОК) и осцилляционных систем. Помимо выявления свойств СОК-систем при бесконечно большом времени нагружения, впервые было проведено рассмотрение детерменистских и стохастических СОК-моделей при конечном времени нагружения. Также в рамках модификации уже существующих методов решения прямых и обратных задач была рассмотрена задача нахождения функции с компактным носителем v по абсолютному значению ее преобразования Фурье $|Fv|$ на шаре в размерности $d \geq 1$. Полученные

результаты далее были применены для решения монохроматической бесфазовой обратной задачи рассеяния для уравнений Гельмгольца и Шредингера в размерности $d \geq 2$.

Большое внимание уделялось теоретическим и экспериментальным исследованиям новых направлений сейсмометрии, а именно применению распределенного акустического зондирования (DAS). Эта работа имеет высокую практическую значимость, во-первых, потому, что для сейсмологических приложений могут быть использованы существующие телекоммуникационные оптоволоконные кабели, во-вторых, как показывает мировая практика, в ближайшее время с помощью DAS можно будет получать качественные данные практически под любую сейсмологическую задачу. Помимо теоретических исследований в отчетный период в рамках эксперимента на льду Клязьминского водохранилища были получены предварительные результаты, показавшие возможность использования DAS для регистрации сейсмоакустических сигналов в ледяном щите.

Также значимыми в практическом отношении были исследования по тестированию качества работы цифровой системы сбора сейсмологической информации в полевых условиях, в рамках которых были сформулированы требования к минимальному набору оборудования и входному сигналу, подаваемому на вход системы, а также разработана методика проведения самого эксперимента. Работы по систематизации геофизической информации включали в себя детальное описание и анализ базы данных механизмов очагов землетрясений Восточной Арктики.

В отчетном периоде была продолжена разработка вероятностной методики оценки параметров возможных цунами, включающая в себя построение синтетических каталогов очагов землетрясений и учет закона повторяемости землетрясений. Добавлены возможности моделирования более сложных очагов землетрясений (с неоднородным распределением подвижки). Методика была применена для оценки параметров возможных цунами для двух районов Камчатки – участка побережья Авачинского залива акватории Тихого океана от устья р. Халактырка до оз. Котельного и важной в транспортном отношении Октябрьской косы. Отметим, что первый район включает в себя крупный Халактырский пляж, находящийся вблизи от г. Петропавловска-Камчатского, и активно развивающийся в настоящее время как туристический объект.

Исследования по теме в 2024 году выполнялись в рамках приоритетного направления Плана фундаментальных поисковых научных исследований на 2021–2030 гг. 1.5.1.5. «Сейсмология и методы сейсмической томографии».

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Моделирование очаговых параметров землетрясений и процессов их подготовки

1.1 Очаговые параметры землетрясений Прибайкалья и Забайкалья

Совместно с сотрудниками Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН и ИЗК СО РАН проведены детальные исследования ряда землетрясений, произошедших в 2017–2023 гг. в ранее слабоактивных районах Прибайкалья и Забайкалья. Интерес к этим событиям вызван тем, что данные о механизмах их очагов могут частично восполнить недостаток информации о напряженно-деформированном состоянии земной коры рассматриваемых регионов и позволяют сделать выводы относительно геометрии и кинематики разломных зон, к которым они приурочены.

Во-первых, рассмотрены два землетрясения, произошедшие 18.10.2017 г. и 25.10.2017 г. в Западном Забайкалье [1]. Очаги обоих событий были смоделированы в приближении мгновенного точечного источника, а именно, двойной пары сил с моментом, по оригинальной методике, разработанной в ИТПЗ РАН [2, 3]. Основными исходными данными для анализа служили амплитудные спектры поверхностных волн, определенные с помощью спектрально-временного анализа [4]. Механизмы очагов обоих событий подтвердили преобладание в рассматриваемом районе сжимающих напряжений (рис. 1). Для обоих землетрясений были также рассчитаны: скалярный сейсмический момент $M_0=5.0 \cdot 10^{15}$ Н·м, моментная магнитуда $M_w=4.4$ и глубина гипоцентра $h=7$ км для события 18.10.2017 г.; $M_0=3.5 \cdot 10^{15}$ Н·м, $M_w=4.3$ и $h=29$ км для события 25.10.2017 г. Исходя из положения эпицентра и механизма очага, показано, что землетрясение 18.10.2017 г. связано с небольшим по протяженности восток–юго-восточным сегментом Тэс-Селенгинского (Джида-Дээлтэрийнского) разлома (рис. 1а). Об активности этой структуры до настоящего времени данных практически не было. Землетрясение 25.10.2017 г., с одной стороны, может быть связано с погребенным сегментом Эгитинского разлома (рис. 1б). С другой стороны, на более ранних картах выделялась небольшая локальная разрывная структура, выявленная по геофизическим данным и имеющая субмеридиональное простирание, к которой также может быть приурочено рассматриваемое событие (рис. 1в).

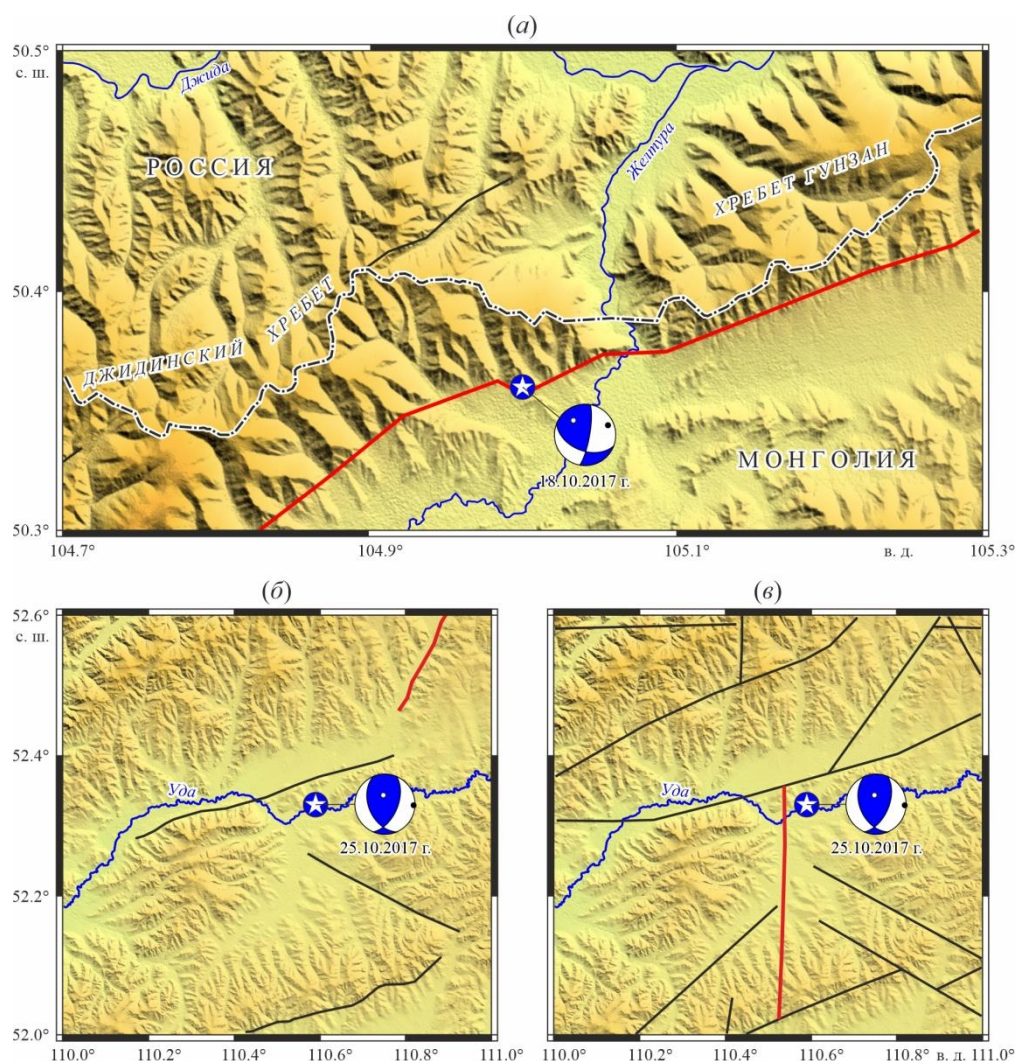


Рисунок 1. Возможная тектоническая позиция землетрясений 18.10.2017 г. (а) по [5] и 25.10.2017 г. по [6] (б) и [7] (в). Красным цветом обозначены разломы, с которыми предположительно связаны очаги рассматриваемых землетрясений.

Во-вторых, для Тофаларского землетрясения 06.09.2021 г. ($M_w=5.4$) и его сильнейшего афтершока ($M_w=4.6$) также по данным поверхностных волн проведено моделирование очага в приближении мгновенного точечного источника (рис. 2) [2, 3] и сдвиговой дислокации эллиптической формы [8] (только для главного толчка). Кроме того, по данным объемных волн, зарегистрированных на региональных станциях, определено положение для 31 афтершока с $M>1.8$ (до конца 2021 г.) (рис. 3). Для этого использовался региональный алгоритм, минимизирующий невязки времен вступлений прямых P - и S -волн [9], а также программный комплекс HYPOINVERSE-2000 [10]. В [11] показано, что Тофаларское землетрясение, приуроченное к малоактивному северо-западному сегменту Главного Саянского разлома, произошло под влиянием ЮЗ-СВ сжатия (рис. 2), характерного для Западной Монголии [12]. Механизм очага сильнейшего

афтершока (рис. 2) и вытянутость поля эпицентров афтершоков (рис. 3а) свидетельствуют об активизации разрывных структур СВ простирания после главного толчка. При этом положения афтершоков, определенные с использованием различных алгоритмов локации близки между собой (рис. 3б). Исходя из полученных результатов сделано предположение, что на рассматриваемом северо-западном участке Главный Саянский разлом выполаживается с глубиной, т.е. является листрическим, как и в случае с его юго-восточным сегментом [13]. Также они могут указывать на существование в пределах разломной зоны разрывных нарушений различной ориентации.

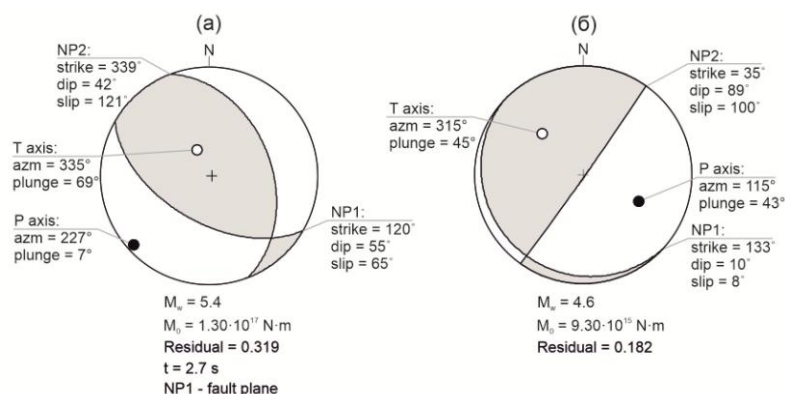


Рисунок 2. Очаговые параметры Тофаларского землетрясения (а) и его сильнейшего афтершока (б). Для главного толчка также указана полная длительность очага и плоскость разрыва, определенные по результатам моделирования очага в виде плоской дислокации эллиптической формы.

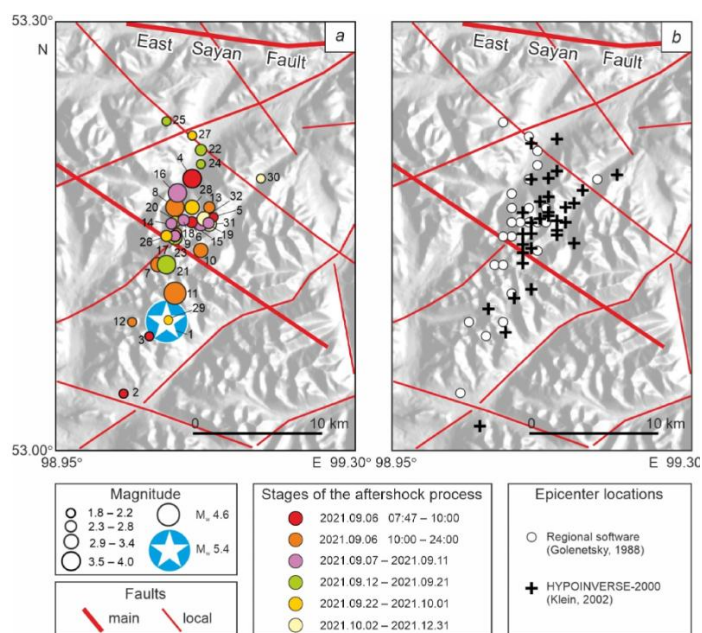


Рисунок 3. Эпицентры Тофаларского землетрясения и его афтершоков (31 афтершок с $M \geq 1.8$ с 06.09.2021 г. по 31.12.2021 г. На панели (а) номера афтершоков указаны в хронологическом порядке (использован алгоритм [9]). Сильнейший афтершок с $M_w=4.6$ –

номер 11. На панели (b) приведено положение афтершоков, определенное с использованием алгоритмов [9] (белые кружки) и [10] (крестики).

Наконец, в [14] было рассмотрено землетрясение 27.12.2023 г. ($m_b=5.4$), произошедшее на окраине Сибирской платформы в ранее асейсмичном районе, на северо-западных склонах хребта Аkitкан (рис. 4), благодаря чему его можно рассматривать как одно из наиболее интересных сейсмических событий в Байкальском регионе за последние годы. Эпицентр землетрясения пространственно приурочен к структурному шву, разграничивающему Сибирскую платформу и Байкальскую складчатую область и представляющему собой глубинный разлом с надвиговой кинематикой смещений. Механизм очага (рис. 11) был определен по данным о знаках первых вступлений P -волн на региональных станциях с помощью программного обеспечения, разработанного в ИТПЗ РАН [15]. Полученный механизм демонстрирует сбросовые смещения в наклонных плоскостях разрывов субмеридионального простирания, согласующегося с ориентацией структурного шва. Данный факт не противоречит сейсмогеологическим данным, свидетельствующим о том, что на отдельных участках зон глубинных разломов с надвиговой кинематикой смещений может наблюдаться инверсия тектонических движений [16]. Вполне возможно, что сбросовая подвижка в очаге Аkitканского землетрясения произошла по плоскости древнего надвига. Аkitканское землетрясение 27.12.2023 г. подтверждает современную сейсмическую активность Аkitканской зоны ВОЗ, а также принципиальную возможность генерации довольно сильных сейсмических событий структурами окраины Сибирской платформы.

Результаты раздела 1.1 опубликованы в трех статьях [1–3] (Приложение А), в том числе одной [2] в журнале Q1 по Scopus, и представлены в виде приглашенного доклада на конференции [1] (Приложение Б).

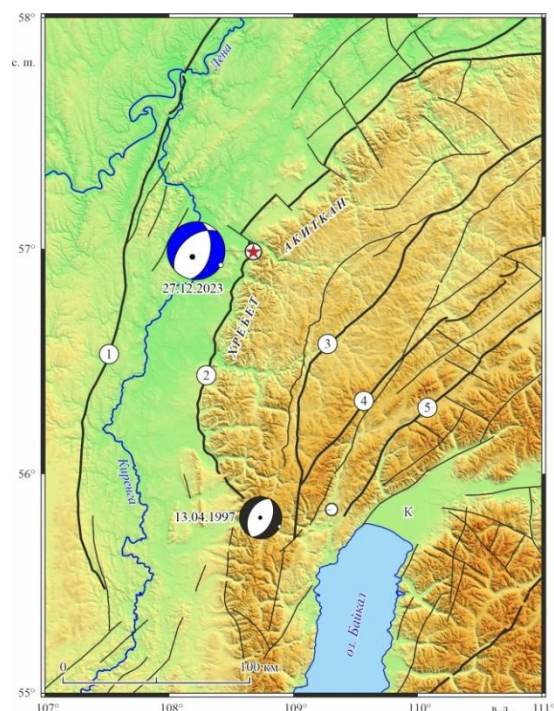


Рисунок 4. Схема разломов исследуемого района (по [17], с упрощениями) и механизмы очагов Аkitканского землетрясения 27.12.2023 г. [14] и землетрясения 13.04.1997 г. [18]. Цифрами в кружках обозначены генеральные разломы (толстые линии): 1 – Киренско-Джербинский; 2 – Аkitкано-Джербинский; 3 – Чуйский; 4 – Абчадский; 5 – Байкало-Сыннырский. К – Кичерская впадина.

1.2 Землетрясения Камчатки и Дальнего Востока России

Совместно с сотрудниками Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН завершены детальные исследования сильного Парамуширского землетрясения 25.03.2020 г. ($M_w=7.4$), эпицентр которого был расположен на северо-западе Тихого океана в пределах Курило-Камчатского глубоководного желоба, юго-восточнее фронта зоны субдукции [19]. Показано, что очаг землетрясения расположен в Тихоокеанской плите на глубине 20–70 км (основной диапазон глубин афтершоков) в области ее изгиба перед погружением в зону субдукции. Механизм очага – взброс с субгоризонтальной осью сжатия, направленной на северо-запад поперек простиранья Курило-Камчатского желоба и параллельного ему вала Зенкевича. Инструментальный эпицентр находится в глубоководном желобе юго-восточнее фронта зоны субдукции. Таким образом, Парамуширское землетрясение является внутриплитным событием. Смена условий растяжения на сжатие океанической плиты с ростом глубины наблюдается и в пределах афтершоковой области. По данным об афтершоках были проведены оценки размеров очага в приближении плоской дислокации эллиптической формы – длина (большая ось эллипса) – 110 км, ширина (меньшая ось) – 40 км (рис. 5). По результатам трехмерного

анализа областей концентрации афтершоков были выделены два пространственных кластера, один из которых приблизительно соответствует плоскости, падающей на юго-восток, и охватывает большую часть очага, а второй состоит из афтершоков меньшей глубины и ограничивает очаг с северо-востока.

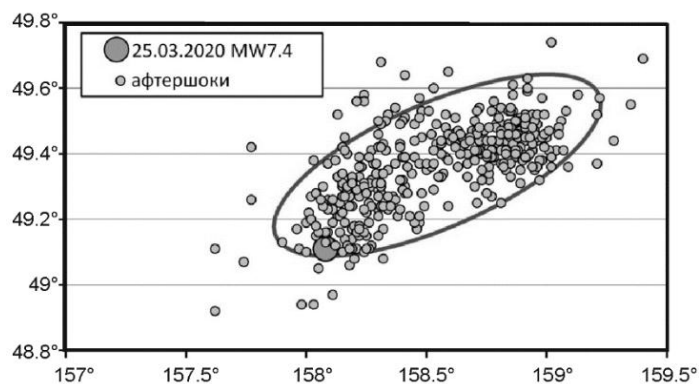


Рисунок 5. Положение Парамуширского землетрясения и его афтершоков, а также расчетная эллиптическая площадь очага. Представлены афтершоки представительного уровня магнитуды – $M_L \geq 3.55$. Эллипс включает в себя 90 % всех афтершоков.

Кроме того оперативно проведено исследование сильного землетрясения, произошедшего в августе 2024 г. в акватории Авачинского залива вблизи от г. Петропавловска-Камчатского и ощущавшегося в городе с силой 5 баллов (Шипунское землетрясение 17.08.2024 г., $M_w=7.0$). Определен механизм очага Шипунского землетрясения, положение его афтершоков (рис. 6), собраны данные о макросейсмических эффектах и т.д.

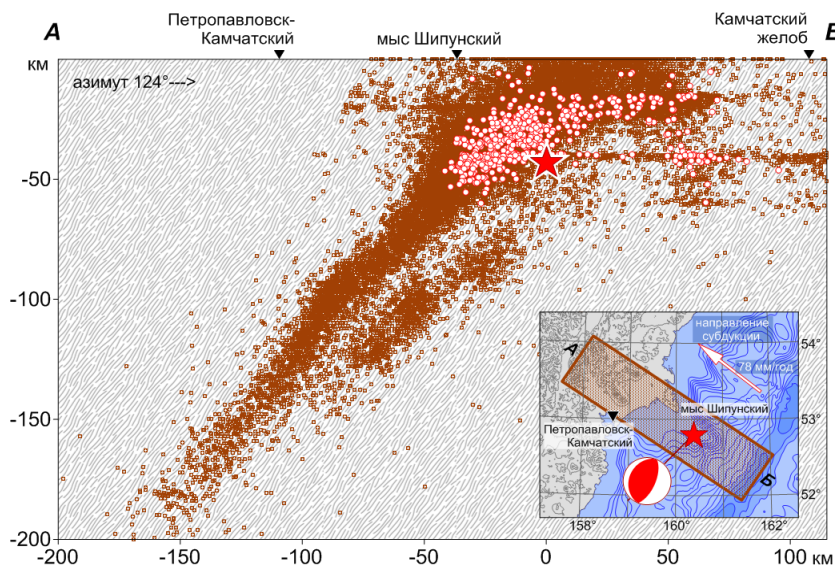


Рисунок 6. Вертикальный разрез Камчатской сейсмофокальной зоны до глубины 200 км (коричневые кружки) и положение в ней облака афтершоков Шипунского землетрясения за период с 17.08–17.09.2024 г. (красные кружки) по данным Каталога землетрясений

Камчатки и Командорских островов. На врезке прямоугольником показана полоса АБ, землетрясения которой включены в разрез. Звезда и тензорная диаграмма – гипоцентр и механизм главного толчка Шипунского землетрясения.

По результатам исследований, представленным в разделе 1.2, опубликована 1 статья [4] (Приложение А) и одна статья направлена в журнал «Вулканология и сейсмология».

1.3 Спектральные характеристики землетрясений и межмагнитудные соотношения

Совместно с сотрудниками МГУ и ФИЦ ЕГС РАН были проведены исследования спектральных параметров землетрясений и межмагнитудных соотношений для двух сейсмоактивных регионов России – района, включающего в себя Ключевскую группу вулканов на Камчатке, и Северного Кавказа.

Ключевская группа вулканов – уникальный вулканический кластер, в том числе с точки зрения сейсмологии. Здесь наблюдаются классические высокочастотные и длиннопериодные землетрясения разной глубинности, а установка временных станций в рамках проекта KISS (Klychevskoy Investigation – Seismic Structure of an Extraordinary Volcanic System, 83 сейсмические станции в 2015–2016 гг.) позволила применить новые методы для классификации наблюдающейся сейсмичности. В рамках проведенных работ впервые для вулканической сейсмичности на территории РФ определены спектральные параметры, а именно сейсмические моменты, и установлены межмагнитудные соотношения для длиннопериодных и высокочастотных землетрясений магнитудного диапазона $M_w=1-3$ [20]. Впервые отмечен разный характер зависимости полученных моментных магнитуд для длиннопериодных и высокочастотных землетрясений от региональной магнитуды (рис. 7). Так, полученные моментные магнитуды для длиннопериодных землетрясений практически не зависят от региональных магнитуд, что может быть связано как с узким диапазоном исследуемых магнитуд, так и с физикой очага таких событий.

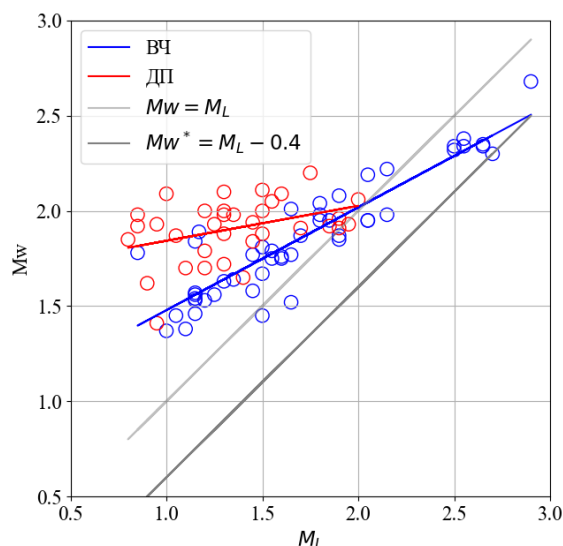


Рисунок 7. Зависимость полученных в ходе данного исследования [20] моментных магнитуд M_w от локальной магнитуды M_L для высокочастотных (синие) и длиннопериодных (красные) землетрясений, записанных вблизи Ключевской группы вулканов временной системой наблюдений KISS.

Определены спектральные параметры 127 землетрясений Северного Кавказа с за 2008–2021 гг., а именно сейсмический момент (и моментная магнитуда, соответственно), характерная частота и сброшенное напряжение, с доверительными интервалами для каждого из параметров. Расчеты проводились для модели Брюна [21] с использованием пакета SEISAN. На основании полученных параметров очагов проведено детальное изучение межмагнитудных соотношений с телесейсмической магнитудой mb^{ISC} и локальной магнитудой (рис. 8). Показано, что для магнитудного диапазона $M=3–5$ землетрясений Северного Кавказа наблюдаются сопоставимые общие линейные зависимости, с наклоном близким к единице, кроме $mb^{GS\ RAS}$. Однако невязки σ у полученных соотношений различаются, особенно для mb^{ISC} , поэтому использовать индивидуальные оценки mb для Северного Кавказа следует с осторожностью, несмотря на сопоставимую с M_L и M_w среднюю разность с M . Такой разброс индивидуальных оценок может быть связан с использованием скоростной модели ak135, в то время как для M , M_L и M_w используются региональные скоростные модели.

Результаты исследований, представленных в разделе 1.3, опубликованы в одной статье [5] (Приложение А) и представлены в виде устных докладов [2, 3] на всероссийских и международных конференциях (Приложение Б).

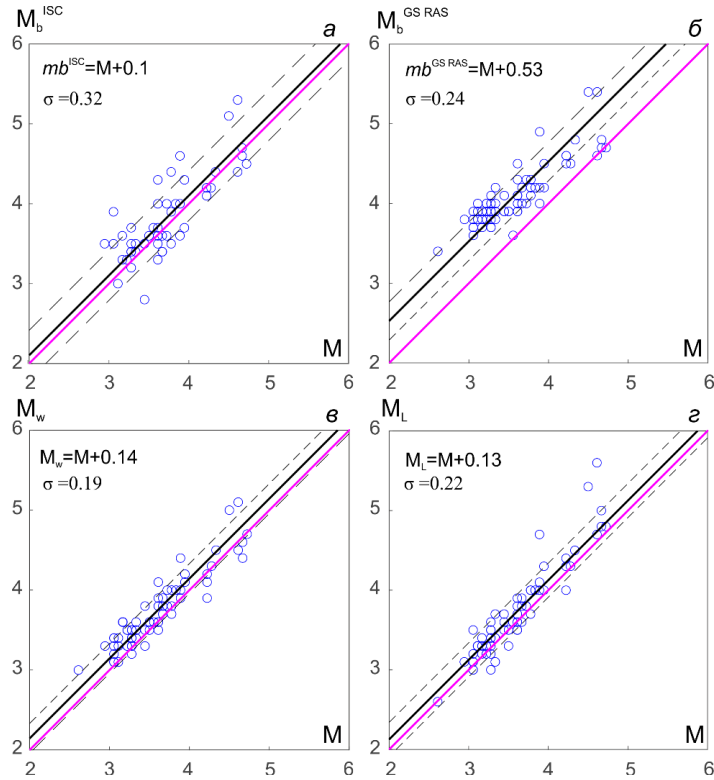


Рисунок 8. Соотношения между магнитудами M , определенными классическим пересчетом из энергетического класса, и M^* где $M^* = mb^{\text{ISC}}$ (а); $mb^{\text{GS RAS}}$ (б); M_w (в); M_L (г). Среднюю связь дает сплошная черная линия $y = x + \text{const}$ (в верхних левых углах), штрих-пунктиром даны их графики с σ – стандартное отклонение. Сплошные розовые линии соответствуют связи типа 1:1 (когда $M = \underline{M^*}$). Результаты получены при аппроксимации данных простой регрессией с фиксацией наклона $b = 1.0$.

1.4 Разработка математического аппарата для решения прямых и обратных задач

Рассмотрена задача нахождения функции с компактным носителем v по абсолютному значению ее преобразования Фурье $|Fv|$ на шаре в размерности $d \geq 1$. В статье [22] предложены теоретические и численные методы восстановления искомой функции. Для компенсации недостающей фазовой информации использовался метод априорно известной фоновой информации. В частности, получены теоретические и численные результаты по нахождению v по абсолютному значению преобразования Фурье $|F(v+w)|^2$, где w – априорно известная ненулевая функция с компактным носителем, достаточно отделенная от v . Иллюстрация численного восстановления для двумерного случая ($d = 2$) приведена на рис. 9. Полученные результаты далее были применены для решения монохроматической бесфазовой обратной задачи рассеяния для уравнений Гельмгольца и Шредингера в размерности $d \geq 2$ [23]. Получены результаты единственности и даны примеры неединственности для этой задачи для случая функции

источника с компактным носителем, установлена липшицевская оценка устойчивости для фазового случая. Приведены связи с обратной задачей рассеяния для дискретных операторов Шредингера в борновском приближении.

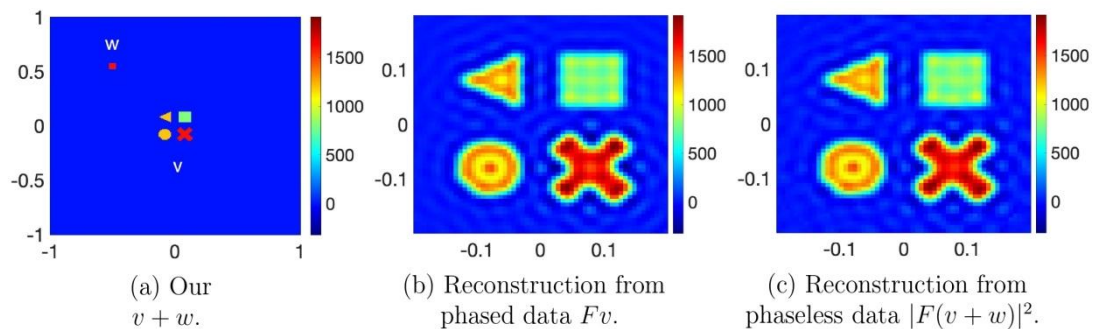


Рисунок 9. Пример восстановления функции по модулю ее преобразования Фурье с помощью метода априорно известной фоновой информации ($d = 2$): (a) – вид искомой функции v и априорно известной функции w ; (b) – результат восстановления функции v , если информация о фазе известна; (c) – результат восстановления функции v без фазовой информации при априорно известной ненулевой функции w .

Также была рассмотрена плоская волна, радиационное решение и сумма этих решений (полное решение) для уравнения Гельмгольца во внешней области в R^3 [24]. Для луча в этой области такого, что его направление отличается от направления распространения плоской волны, показано, что ограничение радиационного решения на этот луч однозначно определяется интенсивностью полного решения на произвольном интервале этого луча. В качестве следствия также установлено, что ограничение радиационного решения на любую плоскость во внешней области однозначно определяется интенсивностью полного решения на произвольной открытой области в этой плоскости.

Полученные результаты могут применяться в различных областях физики и геофизики. В частности, они могут быть применены для анализа кода-волн землетрясений, часто рассматриваемых в рамках модели однократного рассеяния.

Результаты раздела 1.4 опубликованы в 3 статьях [6–8] (Приложение А), в том числе в двух [6,7] в журнале Q1 по Scopus, и представлены в виде устных докладов [4–8] международных конференциях (Приложение Б).

1.5 Модели самоорганизующейся критичности и осцилляционные системы

Модели самоорганизующейся критичности (СОК) представляют собой класс моделей, в которых предполагается, что происходит медленное накопление напряжений и затем их пространственное перераспределение за короткий интервал времени. Таким образом, СОК-модели могут быть использованы для описания процессов подготовки и возникновения землетрясений (динамики нагружения сейсмоактивного региона). За отчетный период в работах [25, 26] были выполнены теоретические исследования поведения СОК-систем.

Модели СОК делятся на два основных типа: детерменистские (модель Бак-Танг-Визенфельда (БТВ)) и стохастические (модель Манна). Анализ эволюции напряжений в этих моделях выявляет устойчивые проявления цикличности. В статье [25] для детерменистской модели Бак-Танг-Визенфельда (БТВ) при бесконечно малой скорости нагружения было показано, что динамика напряжений может быть описана как «циклы» постепенного нагружения с резким сбросом напряжения и переходом системы в подкритическую область. Внутрицикловая динамика характеризуется $1/f$ спектром, который соответствует освобождению напряжений в критической области. В работе [26] для моделей БТВ и Манна проведены исследования поведения СОК-систем с конечной (не бесконечно малой) скоростью нагружения. Показано, что свойства поведения системы существенно зависят от скорости нагружения и могут радикально отличаться от случая адиабатического нагружения. Изменения свойств поведения с изменением скорости поведения могут происходить скачком. Эти изменения происходят по-разному в моделях Манна и БТВ.

Поскольку циклы в СОК-системах проявляются в осцилляциях в широком интервале масштабов и характеризуются проявлениями мультифрактальности задачи, их рассмотрение тесно связано с изучением осцилляционных систем. В работе [27] теоретически рассматривается сближение поведений двух осцилляторов ван дер Поля с разными частотами и связью осцилляторов по скоростям. Рассматриваются два режима: с незначительным превышением силы связи над разностью частот и с многократным превышением силы связи над разностью частот. В первом случае осцилляторы быстро приближаются к предельному циклу сложной геометрии и их допредельное поведение характеризуется вертикальным сдвигом между траекториями осцилляторов. В случае сильной связи сходимость к предельному поведению замедляется и становится обратно-пропорциональной силе связи. Вертикальный сдвиг между траекториями осцилляторов уменьшается с ростом связи.

Также было проведено исследование осцилляционной системы, большую часть времени находящейся в квази-синхронизированном состоянии, в которой возникают изолированные события десинхронизации осцилляторов. Система описывается уравнениями Курамото из четырех связанных осцилляторов с частичной синхронизацией. По разности фаз крайних осцилляторов строится функционал асимметрии параметра порядка [28]. Указанный функционал отражает отклонение системы от синхронизации и используется для прогноза изолированных событий десинхронизации. Алгоритм имеет два параметра: пороговое значения асимметрии параметра порядка и продолжительность времени тревоги T . При превышении порогового значения асимметрией параметра порядка объявляется тревога на время T . Было показано, что малая асимметрия каплингов $\delta = 0.001$ дает постоянную ошибку прогноза (синие точки на рис. 10а), в то время как при увеличении асимметрии каплингов $\delta = 0.02$ (красные точки), прогноз начинает зависеть от асимметрии естественных частот (A_{ns}). Алгоритм был применен к прогнозу единственного наблюдаемого события десинхронизации в солнечных индексах (рис. 10б). Показано, что перед событием 1960 года [29] функционал асимметрии параметра порядка начинает расти, что позволяет предсказать единственное наблюдаемое событие десинхронизации в солнечных индексах.

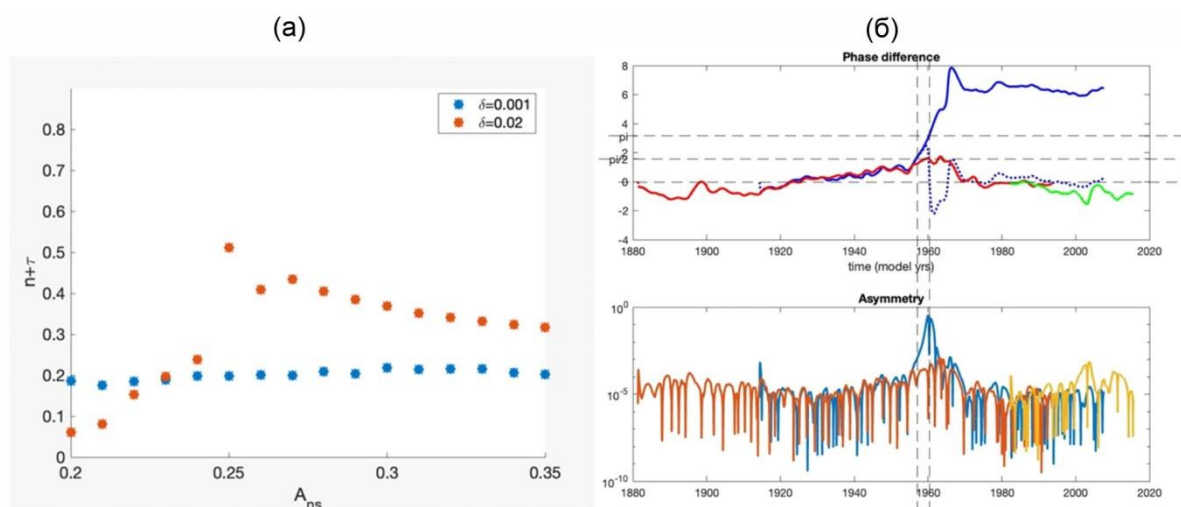


Рисунок 10. (а) – Суммарная ошибка прогноза при увеличении асимметрии естественных частот для различных значений асимметрии каплинга. (а) – Разности фаз между индексами полярного поля в северной и южной полусфере (вверху), построенные по данным из разных источников: MWO – красный, Pulkovo – синий, WSO – зеленый, функционал асимметрии (внизу), построенный по указанным данным: MWO – красный, Pulkovo – синий, WSO – желтый.

Результаты, представленные в разделе 1.5, опубликованы в 3 статьях [9–11] (Приложение А) в журналах Q1 по Scopus, и представлены в виде устного доклада на всероссийской конференции [9] (Приложение Б).

2 Методы сейсмометрии, сбора и систематизации геофизических данных

2.1 Применение волоконно-оптических технологий в сейсмометрии

В настоящее время на основе оптических кабелей разрабатывается множество различных датчиков. Используются эффекты, с которыми приходилось бороться при передаче информации. Рассеяние и отражение, интерференция и вращение поляризации относятся к числу эффектов. Однако в среде геофизиков эти новые технологии прививаются весьма медленно. В результате проведенных в отчетном периоде обзоров [30] были отмечены наиболее интересные и перспективные для геофизики реализации волоконно-оптических технологий. К ним отнесены: (1) кабель SMART (Science Monitoring and Reliable Telecommunications), в котором стандартные оптоволоконные телекоммуникационные кабели внутри ретрансляторов оснащены донными измерительными приборами; (2) подключение практически любых датчиков к оптическому волокну, используемому для распределенных измерений без нарушения оптического кабеля посредством вибрационных излучателей; (3) сверхдлинные датчики, в которых в качестве датчика выступает весь кабель целиком или набор датчиков с длинами от ретранслятора до ретранслятора, работающие на основе проходящего по кабелю оптического импульса (включая прохождение его через ретрансляторы), а не слабого обратного рассеяния; (4) распределенное акустическое зондирование (Distributed Acoustic Sensing (DAS)) [31].

В работе [32] обсуждаются возможности использования DAS-технологии как для телесеismicких измерений, так и для решения томографических задач локального масштаба. Показано, что для телесеismicких измерений DAS может регистрировать сигналы в широком диапазоне частот от нескольких мГц до сотен Гц, обеспечивая при этом измерения на многие десятки километров с высокой пространственной плотностью развернутых виртуальных датчиков. Эта возможность была продемонстрирована в ходе международного эксперимента «Global DAS Month», организованного в феврале 2023 года. Ряд различных производителей DAS предоставили свое оборудование для этой работы. С российской стороны эксперимент проводился ООО «Т8», с которым мы поддерживаем тесные контакты. Результаты измерений доступны для общего доступа.

В [33] проанализировано применение DAS для задач вулканологии. Продемонстрировано, что высокое временное и пространственное разрешение DAS может

способствовать решению проблемы развертывания и обслуживания сейсмических групп на вулканах. Эта система позволяет наблюдать деформацию в пространственном интервале метрового масштаба и в широком диапазоне частот. Многие задачи вулканологии могут быть решены в терминах деформации, т.е. без преобразования данных DAS в смещение, скорость или ускорение. Магматические структуры способны генерировать вторичные сейсмические волны на собственных частотах. Резонансные моды определяют размер и свойства внутренней структуры и уникальны для каждого магматического объекта. Данные о деформациях могут быть использованы для выявления резонансных мод и оценки параметров магматических структур.

Кроме того, в феврале 2024 года на льду Клязьминского водохранилища был проведен эксперимент с целью изучения возможности использования DAS для регистрации сейсмоакустических сигналов, возникающих в плавучем ледяном щите [34–36]. Регистрация сейсмоакустических волн во льду позволяет контролировать параметры льда (толщину, упругие свойства) на достаточно протяженных трассах. Эта задача особенно актуальна в связи с происходящими в Арктике процессами потепления, что приводит к необходимости оценки состояния ледового покрова Северного морского пути. Эксперимент проводился нами совместно с сотрудниками МГУ, ИФЗ РАН, развернувшими на льду сейсмическую косу и проводившими также контроль температуры, и ООО «Т8» со своей системой DAS "Дунай". Для эксперимента был разработан новый способ прокладки волоконно-оптического кабеля с образованием взаимно перпендикулярных колец, которые позволяют измерять деформации волокна, как по линейной группе, так и поперек нее (рис. 11). Дело в том, что датчик, образованный из прямого волоконно-оптического кабеля, проложенного вдоль поверхности льда, чувствителен только к деформациям вдоль кабельной линии. В данном случае наиболее информативной с точки зрения характеристик льда является именно вертикальная составляющая колебаний ледяной плиты, которая эффективно измеряется, например, геофоном, но не регистрируется такой волоконно-оптической линией.

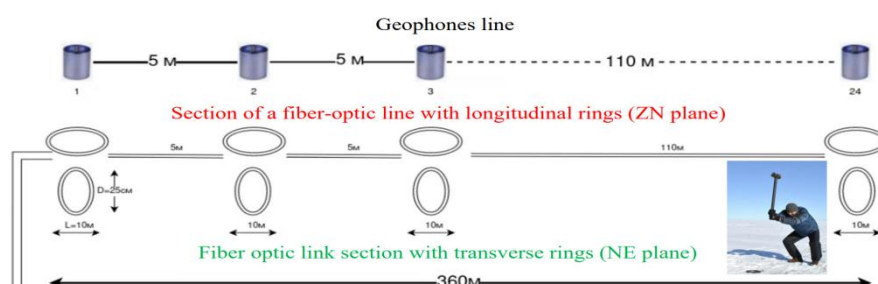


Рисунок 11. Схема проведения эксперимента.

Такая схема была апробирована и продемонстрировала перспективное улучшение восстановления кривой дисперсии на льдине с качеством, сравнимым с сейсмической косой (рис. 12). Таким образом, в ходе эксперимента были получены предварительные результаты, показавшие возможность использования DAS для регистрации сейсмоакустических сигналов в ледяном щите. Дальнейшие исследования в этой области могут привести к разработке новых методов мониторинга параметров льда, батиметрии и даже томографии дна.

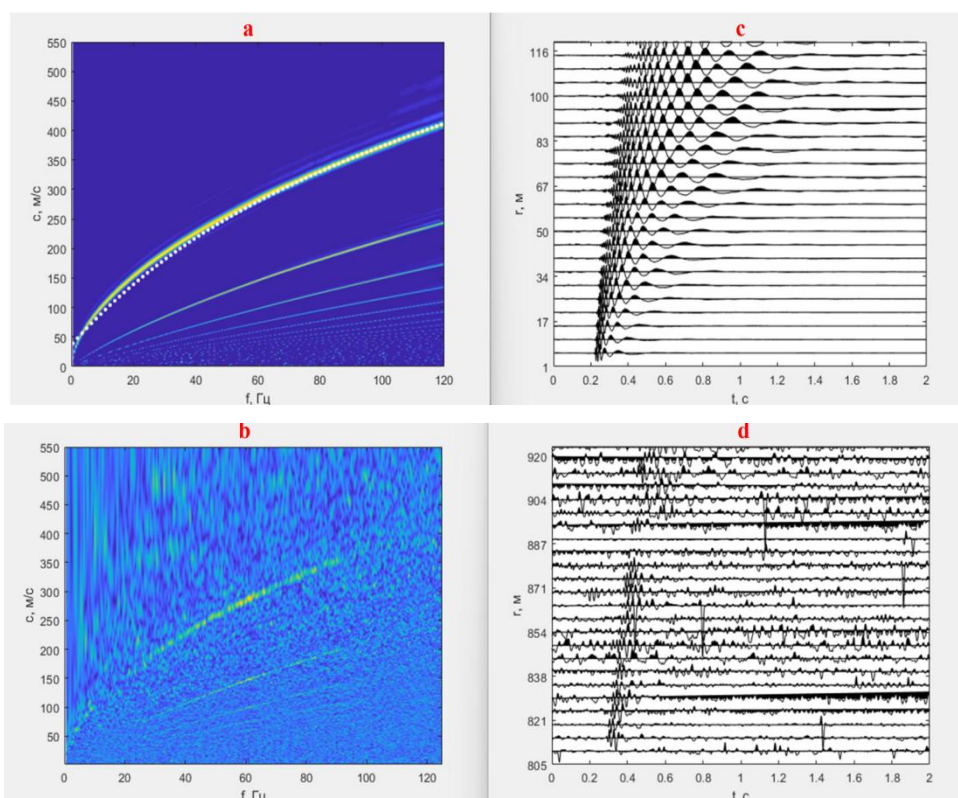


Рисунок 12. Примеры дисперсионных изображений (a, b) и соответствующих им волновых форм (c, d). Панели (a) и (c) относятся к линии геофонов, (b) и (d) – DAS.

Результаты раздела 2.1 были представлены в виде докладов на конференциях [10–18] (Приложение Б), в том числе в виде одного приглашенного доклада [10].

2.2 Анализ качества работы систем сбора сейсмологической информации в полевых условиях

В 2024 г. были продолжены исследования по обеспечению теоретических основ оперативного анализа качества работы систем сбора сейсмологической информации (ЦССИ) в полевых условиях и их практических реализаций. Особое внимание было уделено контролю следующих критических параметров АЦП, входящих в ЦССИ: (1) эффективная разрешающая способность или разрядность; (2) динамический диапазон

входных сигналов, которые могут быть преобразованы без искажений; (3) погрешность смещения нуля; (4) погрешность коэффициента усиления встроенных усилителей входного сигнала; (5) нелинейность передаточной характеристики преобразования; (6) шум дискретизации; (7) дрейф нуля.

Вначале был сформулирован минимальный набор оборудования, необходимый для тестирования 3-х компонентной ЦССИ в полевых условиях (полуторавольтовой батарейки любого типа, небольшого электронного тестера, внешнего модуля тестового генератора низкочастотного гармонического напряжения и ноутбука для обработки записанных данных и оперативного просмотра результатов работы ЦССИ).

Для проведения тестов использовался простой генератор Вина. Он способен генерировать несимметричный относительно нуля гармонический сигнал, все параметры которого были выбраны по следующим соображениям:

- гармонический сигнал позволяет оценить линейность характеристики преобразования. В случае практически идеальных АЦП и генератора в спектре должен присутствовать только один пик, соответствующий частоте генерируемого сигнала;
- частота сигнала, соответствующая 1.9 Гц, находится в рабочем диапазоне частот многих геофизических датчиков, таких как сейсмометры, наклонометры, барографы и т.д., а ее гармоники не пересекаются с 50-Гц гармониками напряжения сети 220 В. Несколько минут записи будет достаточно для проведения всей последующей обработки;
- несимметричные относительно земли или нуля значения максимумов генерируемого сигнала позволяют проверить корректность подключения (не перепутаны ли контакты входных цепей канала АЦП), поскольку отношение по напряжению положительного полупериода генерируемого сигнала к отрицательному составляет 2:1.

В результате была предложена методика проведения контроля корректности работы ЦССИ. На первом шаге нужно вывести на экран компьютера внешний вид записанных сигналов. Следует убедиться, что канал, подключенный к генератору, записал гармонический сигнал без искажений и с правильными значениями положительного и отрицательного максимумов. На канале, к которому была подсоединена батарейка, должно быть постоянное напряжение без скачков и колебаний, по величине соответствующее измеренному с помощью тестера перед началом каждого тестирования. Если напряжения различаются, это может говорить о погрешности коэффициента усиления встроенных усилителей входного сигнала АЦП. На заземлённом (закороченном) канале в случае правильного функционирования не должно быть записано никакого сигнала, кроме незначительного шума в районе нуля (в идеальном случае шум не должен превышать величину одного младшего разряда АЦП). В случае же визуального

присутствия на нем какого-либо сигнала можно говорить о неисправности данного канала или большой величине межканальных проникновений. Далее необходимо провести спектральный анализ сигналов, записанных со всех тестируемых каналов. По ним можно сделать оперативные выводы о состоянии АЦП и уровнях межканальных проникновений и собственных шумов каждого канала. Исследование спектров заземленных входов позволит сделать обоснованные выводы не только об уровне межканальных проникновений, но и о качестве фильтрации помех, создаваемых питающими электрическими сетями (рис. 13).

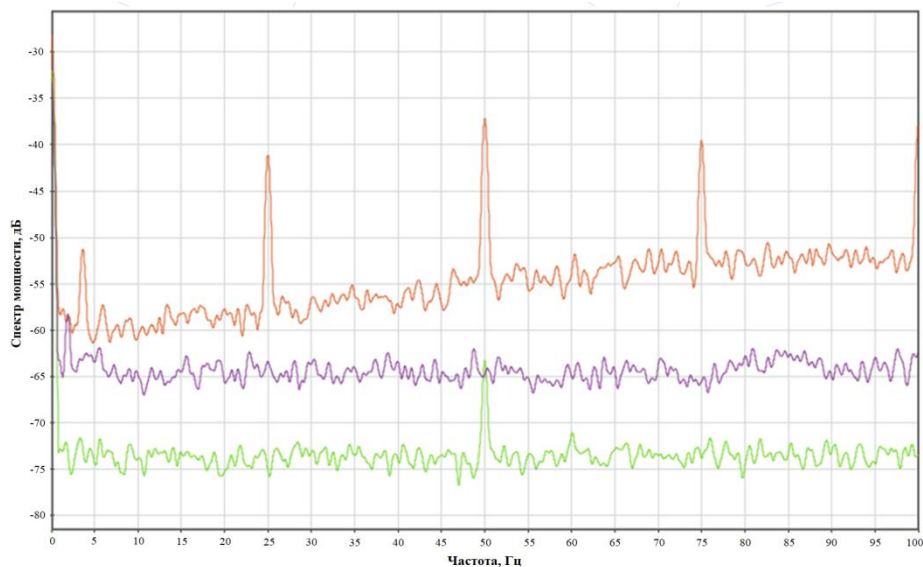


Рисунок 13. Пример спектрального распределения сигналов, записанных с заземленных входов. Коричневый график соответствует некачественной системе сбора, в которой присутствует не только сетевая помеха 50 Гц, но и ее гармоники. На фиолетовом графике отсутствует сетевая помеха, однако просматривается гармонический сигнал с первого канала на частоте 1,9 Гц, что говорит об имеющемся межканальном проникновении. Зеленый график соответствует наилучшей системе сбора по уровню собственных шумов и отсутствию видимого межканального проникновения, но она не отфильтровывает в достаточной мере 50 Гц сигнал, соответствующий бытовым электрическим сетям.

Для оперативной оценки стабильности качества преобразования входных сигналов необходимо построить гистограмму распределения полученных цифровых кодов АЦП с заземленного канала и канала с подключенной батареей за время проведения тестирования. В идеальном случае, повторяющиеся преобразования фиксированных постоянных входных напряжений (0 В и 1.5 В) должны давать один и тот же выходной код. Однако вследствие неизбежного шума, присутствующего во всех схемах АЦП, будет появляться некоторый диапазон выходных кодов для данных входных напряжений. То

есть, записав большое число преобразований, в результате получим некоторое распределение кодов (рис. 14).

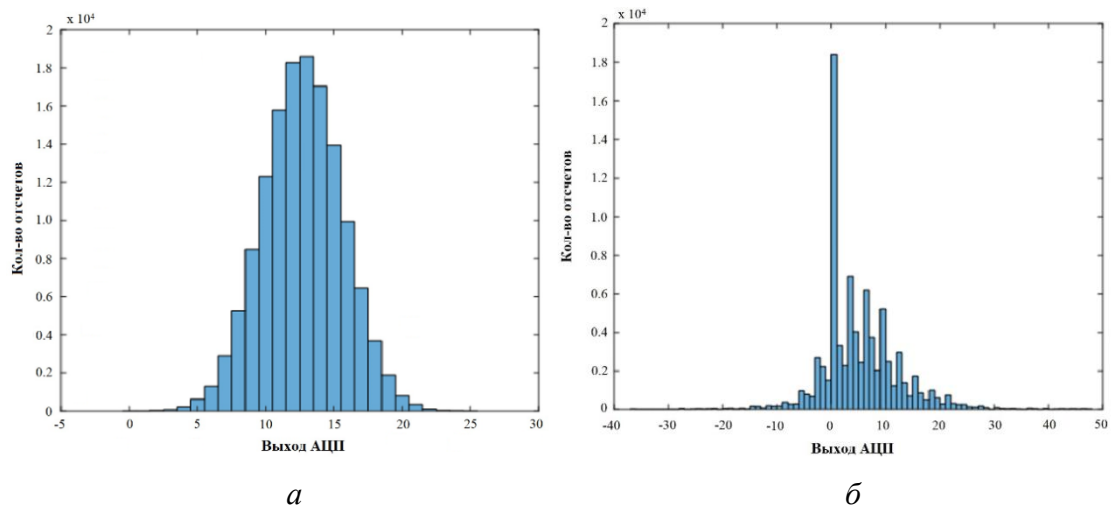


Рисунок 14. Примеры гистограмм распределения кодов выходного сигнала АЦП (статическое распределение вероятности кодов): а — правильное распределение, однако имеется небольшое смещение относительно нуля, б — в случае, когда АЦП системы сбора неисправен ввиду нестабильного преобразования (существенное преобладание определенных кодов).

И наконец, используя данные, собранные заземленным каналом или каналом подключенным к батарее, можно оценить разрешающую способность тестируемой ЦССИ, свободную от паразитных составляющих. Под свободной от шумов разрешающей способностью АЦП понимают число битов разрешения, выше которых невозможно различить отдельные коды. Как уже было сказано ранее, для идеального АЦП уровень шумов будет равен величине одного младшего бита или Last Significant Bit (LSB), но в реальных системах он может существенно отличаться от теоретического. Так, число отсчетов свободных от шумов (N_{FB}) для N -битового АЦП равняется

$$N_{FB} = \frac{2^N \text{ LSB}}{P_{ш}}, \quad (1)$$

где 2^N LSB – это полный входной диапазон кодов N -битового АЦП, а $P_{ш}$ – входной шум от пика до пика. Число свободных от шумов отсчетов может быть преобразовано в свободное от шумов разрешение n_{FB}

$$n_{FB} = \log_2 N_{FB}. \quad (2)$$

Также можно вычислить эффективное разрешение АЦП. Эффективное разрешение позволяет оценить собственные шумы АЦП, так как измерения проходят в условиях постоянного напряжения на входе. В этом случае шум квантования не оказывает влияния на результат. Для вычислений используется отношение полного диапазона входного

сигнала к среднеквадратичному входному шуму (вместо использования величины шума от пика до пика при вычислении величины отсчётов, свободных от шумов). При этом особо следует учитывать, что при использовании одних и тех же данных эффективное разрешение всегда будет больше, чем свободное от шумов на величину $\log_2(6,6)$ или порядка 2.7 бита.

Построив спектр записанного гармонического сигнала, можно оценить величину динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих или Spurious-Free Dynamic Range (SFDR), являющегося безразмерной величиной, вычисляемой как отношение мощности записанного гармонического сигнала (несущей) к мощности наиболее мощной паразитной частотной составляющей (гармоники).

По результатам раздела 2.2 зарегистрирована программа для ЭВМ [1] (Приложение В).

2.3 База данных механизмов очагов землетрясений Восточной Арктики

В 2024 году подготовлено подробное описание составленной нами ранее базы данных механизмов очагов землетрясений Восточной Арктики (№ гос. регистрации 122041300106-8 от 19.02.2024 г.). В базу вошло 595 решений фокальных механизмов для 273 сейсмических событий с $M=2.1-7.6$, произошедших в 1927–2022 годах, таким образом, она существенно превышает по объему информации все имеющиеся на текущий момент времени аналоги. Вид базы на сайте ИТПЗ РАН (<https://www.itpz-ran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/east-arctic/>) показан на рис. 15. В работе [37] приведено полное описание всех параметров землетрясения, вошедших в базу. Особое внимание уделено качеству приводимых решений фокальных механизмов.

Восточная Арктика

Механизмы очагов землетрясений Восточной Арктики

(Focal mechanisms of earthquakes in the East Arctic region)

1927-2022 гг., 60° - 90° N, 90° E - 170° W

☐ Поиск по территории:

☐ Поиск по дате:

☐ Поиск по времени:

☐ Поиск по ID:

☐ Раскрывать по магнитуде:

☐ Раскрывать по глубине:

Найти

Сохранить

id	date	time	lat_deg	lon_deg	M	M0_Nm	h_km	depths	NP1_STK	NP1_DIP	NP1_SLIP	NP2_STK	NP2_DIP	NP2_SLIP	T_Azm	T_P1	P_Azm	P_P1	B_Azm	B_P1
1	1927-11-14	0:12:08	70.2211	128.999	6.8				25.0	65.0	-130.0	268.0	46.0	-35.0	142.0	11.0	247.0	52.0	44.0	36.0
2	1931-02-12	17:22:05	65.3606	136.461	6.4				143.0	64.0	105.0	292.0	29.0	62.0	80.0	67.0	222.0	18.0	316.0	13.0
3	1931-04-14	13:33:02	61.2142	136.593	6.0				192.0	50.0	53.0	61.0	52.0	124.0	35.0	63.0	127.0	1.0	218.0	27.0
4	1939-10-30	4:00:30	65.9019	136.877	5.2				330.0	50.0	90.0	150.0	40.0	90.0	240.0	85.0	60.0	5.0	150.0	0.0
5	1960-12-03	20:20:59	76.64	151.24	5.1				167.0	72.0	-90.0	347.0	18.0	-90.0	257.0	27.0	77.0	65.0	167.0	0.0
6	1962-01-30	17:15:24	79.0	130.0	5.0				268.0	87.0	96.0	24.0	7.0	26.0	185.0	48.0	352.0	42.0	88.0	6.0
7	1962-04-19	23:16:09	69.7372	138.708	6.0		12		120.0	40.0	100.0	287.0	51.0	82.0	153.0	81.0	23.0	6.0	292.0	7.0

Рисунок 15. Вид базы данных «Механизмы очагов землетрясений Восточной Арктики» на сайте ИТПЗ РАН.

Кроме того, применение базы для сопоставления различных решений фокальных механизмов проиллюстрировано в статье на примере Оленекского залива моря Лаптевых и прилегающих к нему территорий (рис. 16). Показано, что для рассматриваемой области сдвиговые механизмы из работы [38] характеризуются невысоким качеством (*poor*), во-первых, за счет того, что для этих землетрясений не удалось рассчитать ни одного отношения амплитуд P , SV - и SH -волн. Во-вторых, все знаки первых вступлений P -волн для них получены по записям удаленных станций, т. е. расположены в центре сетки Вульфа, что затрудняет надежное определение механизма. Таким образом, эти решения следует исключить из дальнейшего анализа. Для землетрясений 25.11.1987 г. и 01.02.1980 г. выбраны наиболее предпочтительные решения и проанализирована их приуроченность к конкретным разломным структурам, представленным в [39].

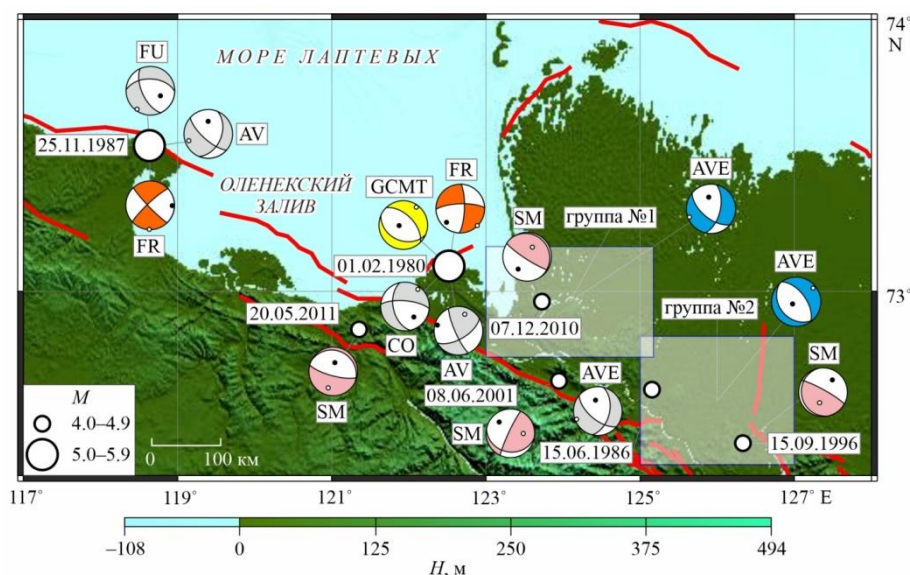


Рисунок 16. Механизмы очагов землетрясений Оленекского залива и прилегающих территорий ($M=4.5-5.4$, 1986–2011 годы). Цветом обозначены решения полученные: серый – по знакам первых вступлений P -волн; оранжевый – по знакам первых вступлений P -волн и отношениям амплитуд P , SV - и SH -волн; желтый – по методам, используемым в GCMT; розовый – по амплитудным спектрам поверхностных волн; синий – решения для групп слабых землетрясений, определенные методом групповой обработки. Для литературных источников введены следующие обозначения: AVE – [40], AV – [41], CO – [42], FR – [38], FU – [43], SM – [44]. Области, для которых получены групповые решения, обозначены серым цветом. Активные разломы показаны красными кривыми согласно [39].

Результаты раздела 2.3 опубликованы в одной статье [12] (Приложение А) и представлены в виде стендового доклада на международной конференции [19] (Приложение Б).

3 Оценки параметров возможных цунами

В 2024 году в рамках темы НИР совместно с Камчатским филиалом ФИЦ ЕГС РАН и с Федеральным исследовательским центром информационных и вычислительных технологий (г. Новосибирск) была продолжена серия работ по оценке цунамиопасности побережий Камчатского региона.

3.1 Разработка методик и создание случайных синтетических каталогов землетрясений

Отдельные модельные землетрясения, составляющие синтетические каталоги, служат для расчета вероятных и экстремальных волн цунами, а вся совокупность событий – для построения вероятностных оценок возникновения подобных катастрофических явлений на исследуемых участках побережий.

Учитывая специфику задачи, создаваемый синтетический каталог включает несколько составляющих:

- набор синтетических субкаталогов, каждый из которых включает модельные землетрясения в узком магнитудном диапазоне (принято $\Delta M \sim 0.2$). В целом субкаталоги охватывают интервал потенциально цунамигенных событий с магнитудами от 7.0 до 9.5. Программная реализация допускает регулирование магнитудных диапазонов;
- закон повторяемости землетрясений разной магнитуды, позволяющий в конечном итоге оценить временные вероятностные свойства воздействия цунами на побережье.

Магнитудные субкаталоги моделируют вероятностные пространственные и очаговые свойства сейсмического процесса, но не учитывают его временные характеристики. Последние включаются в оценки цунамиопасности (после расчета волн цунами от событий субкаталогов) путем учета закона повторяемости. Такой подход позволяет обойти трудность, связанную с весьма редким появлением в реальном сейсмическом процессе сильнейших землетрясений, и детально исследовать возможное разнообразное воздействие таких событий на побережье.

Очаг землетрясения моделируется плоской однородной (по подвижке) дислокацией. Каждое модельное событие синтетического каталога задается набором очаговых параметров, необходимых для расчета порождаемой им волны цунами:

- три пространственные координаты центроида;

- магнитуда;
- размеры прямоугольного очага (длина, ширина);
- положение дислокации в пространстве (углы простирания и падения плоскости разрыва);
- направление (*rake*) и величина подвижки.

Все перечисленные параметры рассматриваются как случайные величины, обладающие распределениями, характерными для каждой цунамигенной области. Распределения могут меняться в пределах одной области. Например, среднее простирание плоскости очагового разрыва обычно меняется вдоль активной островной дуги. Поэтому распределения параметров зависят от положения гипоцентра.

Создание каждого синтетического каталога требует предварительного изучения и построения соответствующих реальных вероятностных распределений, которые включаются в компьютерные программы. Используются эмпирические соотношения между параметрами. Таким образом, каталоги для различных регионов принципиально отличаются между собой набором вероятностных распределений.

Закон повторяемости, прилагаемый к синтетическому каталогу, также строится для каждого цунамигенного региона на основе реальных данных. Используются как мировые и региональные инструментальные каталоги сейсмичности, так и данные о исторических и палеоземлетрясениях. При этом априори не подразумевается линейность закона повторяемости, однако проводится локальная линейная экстраполяция кривой повторяемости в область сильнейших магнитуд.

За отчетный период написаны три компьютерные программы, вырабатывающие синтетические каталоги, моделирующие цунамигенные сейсмические процессы в Курило-Камчатский и Алеутской дугах, а также отдельно для Камчатки: "randcat_KurKam", "randcat_Aleut", "randcat_Kam". Программы позволяют вырабатывать региональные синтетические каталоги произвольной длины. Возможно создание серии независимых (не совпадающих) каталогов, обладающих одинаковыми распределениями очаговых параметров. На рис. 17 приведены примеры синтетических каталогов. На рис. 18 – закон повторяемости землетрясений, прилагаемый к каталогам, вырабатываемым программой "randcat_KurKam".

Кроме того были модернизированы вспомогательные программы:

- "окарolia" (расчет движений дневной поверхности или дна океана, вызываемых очагом землетрясения конечного размера) – добавлена возможность моделирования очагов эллиптической и прямоугольной формы с неоднородным распределением подвижки;

- "svandi" (спектральный и спектрально-временной анализ колебаний) – добавлена возможность оценки положения спектральных пиков для набора реализаций стационарного случайного процесса.

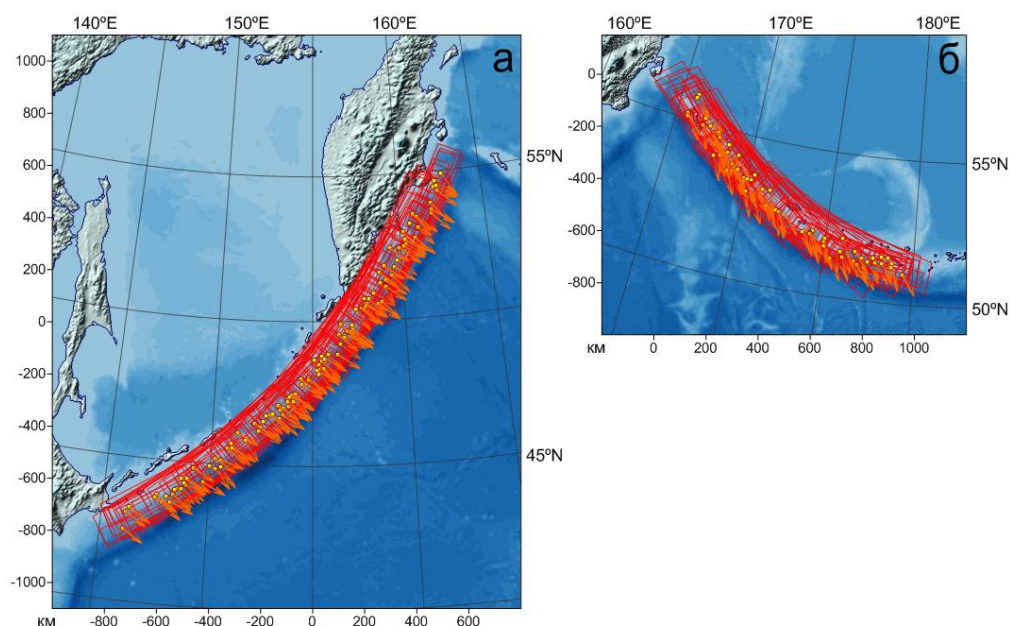


Рисунок 17. Очаги, входящие в синтетические каталоги для Курило-Камчатской (а) и Алеутской (западная и центральная часть) (б) дуг, выработанные программами "randcat_KurKam" и "randcat_Aleut". Представлены несколько субкаталогов для разных магнитудных диапазонов. Прямоугольники – проекции очагов на дневную поверхность, стрелки – направления очаговых подвижек.

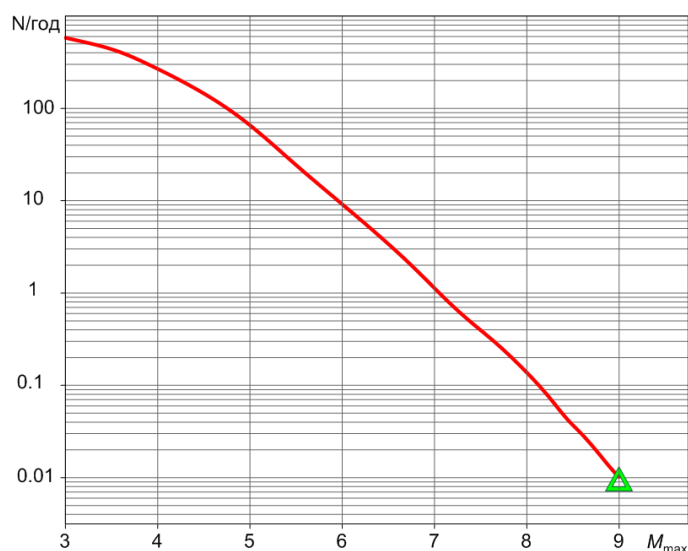


Рисунок 18. Закон повторяемости землетрясений, прилагаемый к синтетическому каталогу Курило-Камчатской дуги. Красная линия построена по данным мировых и региональных инструментальных каталогов (небольшой, $\Delta M \sim 0.5$, участок в области максимальных

магнитуд – результат экстраполяции). Зеленый треугольник – данные палеоземлетрясений.

3.2 Результаты оценок параметров возможных цунами

Описанная в разделе 3.1 методика была применена для оценки параметров возможных цунами для двух районов Камчатки – участка побережья Авачинского залива акватории Тихого океана от устья р. Халактырка до оз. Котельного и Октябрьской косы. Для первого района, включающего крупный Халактырский пляж, находящийся вблизи от г. Петропавловска-Камчатского, и активно развивающийся в настоящее время как туристический объект, работы выполнены предварительно. Основными результатами исследования на этом этапе стали общая характеристика исследуемого района и сейсмического режима района; создание сеймотектонических схем основных цунамигенных зон, угрожающих исследуемому участку побережья; сбор, анализ, обобщение существующих архивных и литературных данных по проявлениям цунами на исследуемом участке побережья (включая палеоизыскания) и методикам вероятностной оценки цунамиопасности побережья. Построены синтетические каталоги модельных очагов цунамигенных землетрясений в выделенных Курило-Камчатской, Алеутской (рис. 17) и Чилийской цунамигенных зонах.

С использованием построенных цифровых моделей рельефов дна и суши созданы системы вложенных расчетных сеток (различные для источников Курило-Камчатской, Алеутской и Чилийской зон), на которых были проведены расчёты для каждого из модельных очагов. Полученные результаты стали основой для определения искомых вероятностных оценок. Для повторяемости в среднем 1 раз в 50 лет пороговые значения амплитуд вдоль исследуемого побережья составляют $1.5 \div 2$ м, 1 раз в 100 лет $-2.6 \div 3.2$ м, 1 раз в 500 лет $-7.3 \div 8.7$ м, 1 раз в 1000 лет $8.2 \div 9.8$ м. Для наиболее опасных для исследуемого побережья источников цунами были определены основные характеристики наката волн на берег: зоны затопления и осушения, максимальные высоты заплеска, толщины водного слоя, продолжительности заливания суши. Определена также максимальная по всем событиям зона затопления. Достоверность полученных результатов подтверждается согласием с данными палеоисследований [45] по повторяемости сильных (с высотой заплеска более 5 м) цунами вблизи оз. Котельное.

Оценки цунамиопасности завершены для важной в транспортном отношении Октябрьской косы на западном побережье Камчатки в работе [46]. Примеры полученных карт предельных пороговых значений высот волн цунами, порожденных очагами землетрясений с различной локализацией, представлены на рис. 19.

По результатам, представленным в разделе 3, опубликована 1 статья [13] (Приложение А) и сделан доклад на конференции [20] (Приложение Б).

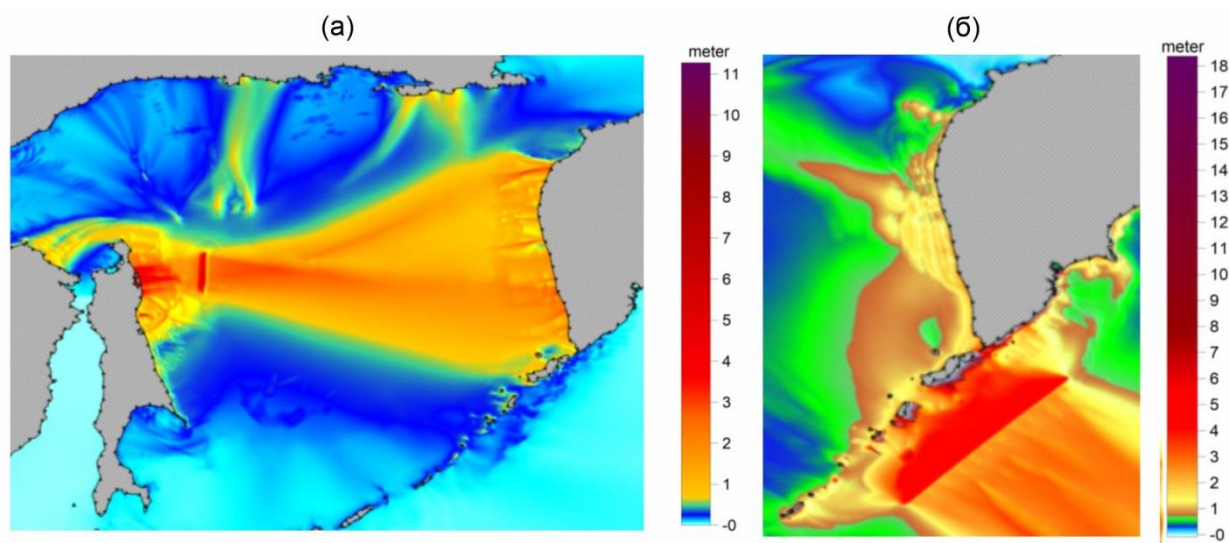


Рисунок 19. Карта максимальных расчетных амплитуд волн цунами от модельного источника, эпицентр которого располагается в акватории северо-восточнее о-ва Сахалин (а) и в непосредственной близости от юго-восточного побережья Камчатки (б). Каждой точке карты соответствует максимальная высота цунами за все время распространения волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках НИР в 2024 году были получены новые данные об очаговых параметрах землетрясений в различных сейсмоактивных районах РФ. Для малоактивной в сейсмическом отношении территории Западного Забайкалья рассмотрены два землетрясения, произошедшие 18.10.2017 г. ($M_w=4.4$) и 25.10.2017 г. ($M_w=4.3$). Механизмы очагов обоих событий подтвердили преобладание в рассматриваемом районе сжимающих напряжений. Кроме того, полученные результаты позволили сделать выводы об активности отдельных разломных структур (Тэс-Селенгинского и Эгитинского разломов), о которых практически не имеется других данных. Исследования Тофаларского землетрясения 06.09.2021 г. ($M_w=5.4$) и его афтершоков, произошедших также в малоактивном районе Восточного Саяна, показало, что главный толчок был приурочен к малоактивному северо-западному сегменту Главного Саянского разлома и сформировался под влиянием ЮЗ-СВ сжатия, характерного для Западной Монголии. Для Аkitканского землетрясения 27.12.2023 г. ($mb=5.4$), произошедшего в ранее асейсмичном районе на окраине Сибирской платформы, было показано, что оно приурочено к структурному шву, разграничивающему Сибирскую платформу и Байкальскую складчатую область. Для этого события получен сбросовый механизм очага, а само оно подтвердило современную сейсмическую активность Аkitканской зоны ВОЗ, а также принципиальную возможность генерации довольно сильных сейсмических событий структурами окраины Сибирской платформы. Это позволяет рассматривать Аkitканское землетрясение как одно из наиболее интересных сейсмических событий в Байкальском регионе за последние годы. Также для территории Камчатки проведены детальные исследования двух сильных землетрясений – Парамуширского землетрясения 25.03.2020 г. ($M_w=7.4$) и Шипунского землетрясения 17.08.2024 г. ($M_w=7.0$).

В результате впервые проведенных для вулканической сейсмичности на территории РФ исследований были определены сейсмические моменты, и установлены межмагнитудные соотношения для длиннопериодных и высокочастотных землетрясений магнитудного диапазона $M_w=1-3$. Впервые отмечен разный характер зависимости полученных моментных магнитуд для длиннопериодных и высокочастотных землетрясений от региональной магнитуды. Показано, что полученные моментные магнитуды для длиннопериодных землетрясений практически не зависят от региональных магнитуд, что может быть связано как с узким диапазоном исследуемых магнитуд, так и с физикой очага таких событий. Для землетрясений Северного Кавказа с $M=3-5$ исследованы соотношения между различными типами магнитуд. Получены сопоставимые общие линейные зависимости, с наклоном близким к единице, кроме $mb^{GS\ RAS}$.

Важные результаты с точки зрения математической теории решения прямых и обратных задач были получены при рассмотрении задачи нахождения функции с компактным носителем v по абсолютному значению ее преобразования Фурье $|Fv|$ на шаре в размерности $d \geq 1$. Получены теоретические и численные результаты по нахождению v по абсолютному значению преобразования Фурье $|F(v+w)|^2$, где w – априорно известная ненулевая функция с компактным носителем, достаточно отделенная от v . Результаты далее были применены для решения монохроматической бесфазовой обратной задачи рассеяния для уравнений Гельмгольца и Шредингера в размерности $d \geq 2$.

В результате теоретических исследований поведения СОК- и осцилляционных систем были получены следующие основные результаты. Во-первых, что для БТВ-модели при бесконечно малой скорости нагружения динамика напряжений может быть описана как «циклы» постепенного нагружения с резким сбросом напряжения и переходом системы в подкритическую область. Внутрицикловая динамика характеризуется $1/f$ спектром, который соответствует освобождению напряжений в критической области. Во-вторых, при рассмотрении СОК-моделей при конечной скорости нагружения показано, что свойства поведения системы существенно зависят от скорости нагружения и могут радикально отличаться от случая адиабатического нагружения. Изменения свойств поведения с изменением скорости поведения может происходить скачком. Эти изменения происходят по-разному в моделях Манна и БТВ. Полученные результаты могут быть использованы для описания процессов подготовки и возникновения землетрясений (динамики нагружения сейсмоактивного региона).

Большое внимание в отчетном периоде было уделено новым направлениям сейсмометрии, а именно применению DAS-технологий. Помимо теоретических исследований, в феврале 2024 года на льду Клязьминского водохранилища был проведен эксперимент с целью изучения возможности использования DAS для регистрации сейсмоакустических сигналов, возникающих в плавучем ледяном щите. Для эксперимента был разработан новый способ прокладки волоконно-оптического кабеля с образованием взаимно перпендикулярных колец, которые позволяют измерять деформации волокна, как по линейной группе, так и поперек нее. Такая схема была апробирована и продемонстрировала перспективное улучшение восстановления кривой дисперсии на льдине с качеством, сравнимым с сейсмической косой.

В 2024 году в рамках темы НИР были продолжены исследования по обеспечению теоретических основ оперативного анализа качества работы ЦССИ в полевых условиях и их практических реализаций. В результате были сформулированы требования к минимальному набору оборудования, необходимому для тестирования ЦССИ, и сигналу,

подаваемому на ее вход. Разработана и зарегистрирована методика проведения контроля корректности работы ЦССИ.

Работы по систематизации геофизических данных включали в себя описание и анализ составленной нами ранее базы данных механизмов очагов землетрясений Восточной Арктики (№ гос. регистрации 122041300106-8 от 19.02.2024 г.). Особое внимание уделено качеству приводимых решений фокальных механизмов. Для Оленекского залива моря Лаптевых продемонстрировано, каким образом выбирать наиболее предпочтительное решение на основании имеющихся в базе данных. Полученные результаты могут использоваться для проведения сеймотектонического анализа, расчетов напряженно-деформированного состояния литосферы, оценки сейсмической опасности для всей Восточной Арктики или отдельных ее регионов, где в настоящее время интенсивно развивается хозяйственная деятельность.

Не вызывает сомнений высокая практическая значимость проведенных в рамках темы НИР исследований цунамиопасности побережий Камчатского региона. За отчетный период была усовершенствована методика расчетов вероятностных характеристик цунами, например, при составлении синтетических каталогов землетрясений добавлена возможность моделирования сложных очагов (прямоугольной или эллиптической формы с неравномерным распределением подвижки). С помощью этой методики были получены оценки параметров возможных цунами для двух районов Камчатки – участка побережья Авачинского залива акватории Тихого океана от устья р. Халактырка до оз. Котельного (включая крупный Халактырский пляж, находящийся вблизи от г. Петропавловска-Камчатского, и активно развивающийся в настоящее время как туристический объект) и важной в транспортном отношении Октябрьской косы.

По результатам выполненных в 2024 году исследований было опубликовано 13 статей в рецензируемых журналах, в том числе 6 – в журналах Q1 по Scopus (Приложение А). По результатам НИР представлено 20 докладов на международных и российских научных конференциях, в том числе сделано 2 приглашенных доклада (Приложение Б). Зарегистрирована 1 программа для ЭВМ (Приложение В).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Radziminovich Ya.B., Filippova A.I., Melnikova V.I., Gileva N.A. The October 18 and 25, 2017 earthquakes in Western Transbaikalia: confirming the present-day activity of local faults // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2024. V. 18. No. 6. P. 544–559. doi:10.1134/S0742046324700805
2. Букчин Б.Г. Об определении параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в случае неточного задания характеристик среды // *Известия АН СССР. Серия Физика Земли*. 1989. № 9. С. 34–41.
3. Lasserre C., Bukchin B., Bernard P., Tapponier P., Gaudemer Y., Mostinsky A., Dailu R. Source parameters and tectonic origin of the 1996 June 1 Tianzhu ($M_w=5.2$) and 1995 July 21 Yongen ($M_w=5.6$) earthquakes near the Haiyuan fault (Gansu, China) // *Geophysical Journal International*. 2001. V. 144. No 1. P. 206–220. doi:10.1046/J.1365-246X.2001.00313
4. Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В., Букчин Б.Г., Бармин М.П., Ратникова Л.И., Итс Е.Н. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. М.: Наука, 1986. 278 с.
5. Zelenin E., Bachmanov D., Garipova S., Trifonov V., Kozhurin A. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // *Earth System Science Data*. 2022. V. 14. P. 4489–4503. doi: 10.5194/essd-14-4489-2022
6. Лунина О.В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // *Геодинамика и тектонофизика*. 2016. Т. 7. № 3. С. 407–434. doi:10.5800/GT-2016-7-3-0215
7. Карта разломов юга Восточной Сибири. Масштаб 1:1500000 / Ред. П.М. Хренов. Л.: ВСЕГЕИ, 1982.
8. Bukchin B. Determination of stress glut moments of total degree 2 from teleseismic surface wave amplitude spectra // *Tectonophysics*. 1995. V. 248. No. 3–4. P. 185–191. doi:10.1016/0040-1951(94)00271-A
9. Голенецкий С.И. Землетрясения Прибайкалья и Забайкалья в 1985 г. // *Землетрясения в СССР в 1985 г. / Ред. Н.В. Кондорская*. М.: Наука, 1988. С. 124–135.
10. Klein F.W. User's guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes. 2002. USGS Open File Report 02-171. Version 1.0.
11. Filippova A.I., Fomochkina A.S., Gileva N.A., Radziminovich Ya.B., Melnikova V.I. The September 6, 2021 M_w 5.4 Tofalaria earthquake at a weakly active segment of the Main Sayan fault (Eastern Siberia) // *Journal of Structural Geology*. 2024. V. 188. 105255. doi:10.1016/j.jsg.2024.105255

12. Heidbach, O., Rajabi, M., Reiter, K., Ziegler, M., 2016. World Stress Map 2016, GFZ Data Service. doi:10.5880/WSM.2016.002
13. Filippova A.I., Bukchin B.G., Fomochkina A.S., Melnikova V.I., Radziminovich Ya.B., Gileva N.A. Source process of the September 21, 2020 Mw 5.6 Bystraya earthquake at the south-eastern segment of the Main Sayan fault (Eastern Siberia, Russia) // *Tectonophysics*. 2022. V. 822. 229162. doi:10.1016/j.tecto.2021.229162
14. Gileva N.A., Radziminovich Ya.B., Melnikova V.I., Filippova A.I., Kobeleva E.A., Fomochkina A.S. December 27, 2023 Akitkan earthquake ($m_b = 5.4$) in the zone of the marginal suture of the Siberian Platform // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2024. V. 60. No. 6. P. 1066–1079. doi:10.1134/S1069351324700885
15. Ландер А.В. Программа расчета и графического представления механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений Р-волн (FA) / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662004 от 25 сентября 2018 г.
16. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука. СО, 1977. 303 с.
17. Митрофанова Н.Н., Болдырев В.И., Коробейников Н.К., Митрофанов Г.Л., Кнутова С.В., Семейкина Л.К., Пай В.М., Владимиров А.Е., Горяинова Л.Н., Макарьев Л.Б. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-49 – Киренск. Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2012. 607 с.
18. Ружич В.В., Мельникова В.И., Гилева Н.А., Смекалин О.П. Северобайкальское землетрясение 13 апреля 1997 года с $M_S=4.2$, $I_0=7$ (Прибайкалье) // *Землетрясения Северной Евразии в 1997 году*. Обнинск: ГС РАН, 2003. С. 226–232.
19. Чебров Д.В., Матвеев Е.А., Абубакиров И.Р., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Павлов В.М., Раевская А.А., Ромашева Е.И., Салтыков В.А., Сеньюков С.Л. Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г. $M_L=7.7$, $M_w=7.4$ // *Землетрясения Северной Евразии*. 2024. Вып. 27 (2020). С. 289–300. doi:10.35540/1818-6254.2024.27.26
20. Molokova A.P., Skorkina A.A., Smirnov V.B. Spectral characteristics for earthquakes of Klyuchevskaya group of volcanoes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2024. V. 60. No 6. P. 1092–1104. doi: 10.1134/S1069351324700903
21. Brune J. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. 1970. V. 75. No. 26. P. 4997–5009. doi:10.1029/JB075i026p04997

22. Hohage T., Novikov R.G., Sivkin V.N. Phase retrieval and phaseless inverse scattering with background information // *Inverse Problems*. 2024. V. 40. 105007. doi:10.1088/1361-6420/ad6fc6
23. Novikov R.G., Sharma B.L. Inverse source problem for discrete Helmholtz equation // *Inverse Problems*. 2024. V. 40. 105005. doi:10.1088/1361-6420/ad7054
24. Новиков Р.Г. Голографическая теорема единственности // *Труды Математического института имени В. А. Стеклова*. 2024. Т. 325. С. 232–237. doi:10.4213/tm4388
25. Shapoval A., Shnirman M. Explanation of flicker noise with the Bak-Tang-Wiesenfeld model of self-organized criticality // *Physical Review E*. 2024. V. 110. 014106. doi:10.1103/PhysRevE.110.014106
26. Tadic B., Shapoval A., Shnirman M. Signatures of self-organized dynamics in rapidly driven critical sandpiles // *Physical Review E*. 2024. V. 110. No. 5. 054203. doi:10.1103/PhysRevE.110.054203
27. Savostianov A., Shapoval A., Shnirman M. Impact of coupling on the road to synchronization of two coupled Van der Pol oscillators // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2024. V. 463. 134166. doi:10.1016/j.physd.2024.134166
28. Elaeva M., Blanter E., Shnirman M., Shapoval A. Asymmetry in the Kuramoto model with nonidentical coupling // *Physical Review E*. 2023. V. 107. 064201. doi:10.1103/PhysRevE.107.064201
29. Blanter, E.M., Le Mouél, J.L., Shnirman M.G., Courtillot V. Kuramoto Model of Nonlinear Coupled Oscillators as a Way for Understanding Phase Synchronization: Application to Solar and Geomagnetic Indices // *Solar Physics*. 2014. 289. P. 4309–4333. doi:10.1007/s11207-014-0568-9
30. Кислов К.В. Fiber optics in geophysics. Distributed acoustic sensing (DAS) // XV школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса – 2024». Санкт-Петербург, Россия, 2024. GC2024-SG036. <https://ucp.academy/events/GC2024/abstract/GC2024-SG036>
31. Кислов К.В., Ашкар Г., Бенгальский Д., Гравиров В.В., Костенко М., Харасов Д., Васильев А., Трещиков В. Demonstration of the capabilities of Distributed Acoustic Sensing technology // XV школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса – 2024». Санкт-Петербург, Россия, 2024. GC2024-SG047. <https://ucp.academy/events/GC2024/abstract/GC2024-SG047>
32. Никитин С., Спиридонов Е., Бенгальский Д., Харасов Д., Ашкар Г., Костенко М., Кислов К.В., Наний О., Старовойт Ю., Трещиков В. Applications of fiber optical DAS equipment for teleseismic observations and tomography tasks in seismology // XV школа-

конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса – 2024». Санкт-Петербург, Россия, 2024. GC2024-SG067.
<https://ucp.academy/events/GC2024/abstract/GC2024-SG067>

33. Гравиров В.В., Кислов К.В. Применение технологии распределенного акустического зондирования в задачах вулканологии // Материалы XXVII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2024. С. 169–172.

34. Ашкар Г., Бенгальский Д., Гравиров В.В., Кислов К.В., Костенко М., Котов А., Преснов Д., Спиридонов Е., Шуруп А. Full-Scale Testing of the Use of Distributed Acoustic Sensing (DAS) Technology to Determine Ice Cover Parameters // XV школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса – 2024». Санкт-Петербург, Россия, 2024. GC2024-SG013. <https://ucp.academy/events/GC2024/abstract/GC2024-SG013>

35. Гравиров В.В., Кислов К.В. Advantages and Disadvantages of Distributed Acoustic Sensing Technology for Geophysics Tasks // XV школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса – 2024». Санкт-Петербург, Россия, 2024. GC2024-SG015. <https://ucp.academy/events/GC2024/abstract/GC2024-SG015>

36. Преснов Д.А., Ашкар Г.Х., Бенгальский Д.М., Гравиров В.В., Кнышов А.А., Костенко М.В., Котов А.Н., Неверов Б.В., Спиридонов Е.П., Шуруп А.С., Кислов К.В. Натурные испытания распределенного акустического сенсора (DAS) для мониторинга параметров ледового покрова // 66-я Всероссийская научная конференция МФТИ, МФТИ, Russia, 1-6 апреля 2024.

37. Filippova A.I., Burlakov I.S., Fomochkina A.S. Database of earthquake focal mechanisms for the East Arctic region // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2024. Vol. 60. No. 5. P. 960–972. doi:10.1134/S1069351324700873

38. Franke D., Krüger F., Klinge K. Tectonics of the Laptev Sea – Moma ‘Rift’ region: investigation with seismologic broadband data // *Journal of Seismology*. 2000. V. 4. P. 99–116. doi:10.1023/A:1009866032111

39. Zelenin E.A, Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // *Earth System Science Data*. 2022. V. 14. No 10. P. 4489–4503. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>

40. Аветисов Г.П. Гипоцентрия и фокальные механизмы землетрясений дельты р. Лены и ее обрамления // *Вулканология и сейсмология*. 1991. № 6. С. 59–69.

41. Аветисов Г.П. Некоторые вопросы динамики литосферы моря Лаптевых // *Физика Земли*. 1993. № 5. С. 28–38.

42. Cook D.B., Fujita K., McMullen C.A. Present-day plate interactions in Northeast Asia: North American, Eurasian, and Okhotsk plates // *Journal of Geodynamics*. 1986. V. 6. P. 33–51. doi:10.1016/0264-3707(86)90031-1
43. Fujita K., Cambray F.W., Velbel M.A. Tectonics of the Laptev Sea and Moma rift systems, northeastern USSR // *Marine Geology*. 1990. V. 93. P. 95–118. doi:10.1016/0025-3227(90)90079-Y
44. Seredkina A.I., Melnikova V.I. New data on earthquake focal mechanisms in the Laptev Sea region of the Arctic-Asian seismic belt // *Journal of Seismology*. 2018. V. 22. No. 5. P. 1211–1224. doi:10.1007/s10950-018-9762-9
45. Pinegina T.K., Bazanova L.I., Zelenin E.A., Bourgeois J., Kozhurin A.I., Medvedev I.P., Vydrin D.S. Holocene Tsunamis in Avachinsky Bay, Kamchatka, Russia // *Pure and Applied Geophysics*. 2018. V. 175. No. 4. P. 1485–1506. doi:10.1007/s00024-018-1830-0
46. Gusiakov V.K., Beisel S.A., Gusev O.I., Lander A.V., Chebrov D.V., Chubarov L.B. Assessment of Tsunami Hazard for the Coast of Oktyabrsky Spit, Western Kamchatka Based on Results of Numerical Modeling // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2024. V. 18. P. 432–445. doi:10.1134/S0742046324700751

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Публикации по теме НИР, изданные в 2024 г.

1. Radziminovich Ya.B., Filippova A.I., Melnikova V.I., Gileva N.A. The October 18 and 25, 2017 earthquakes in Western Transbaikalia: confirming the present-day activity of local faults // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2024. V. 18. No. 6. P. 544–559. doi:10.1134/S0742046324700805 (if=0.7, Q3 Scopus)
2. Filippova A.I., Fomochkina A.S., Gileva N.A., Radziminovich Y.B., Melnikova V.I. The September 6, 2021 Mw 5.4 Tofalaria earthquake at a weakly active segment of the Main Sayan fault (Eastern Siberia) // *Journal of Structural Geology*. 2024. Vol. 188. 105255. doi:10.1016/j.jsg.2024.105255 (if=2.6, Q1 Scopus)
3. Gileva N.A., Radziminovich Ya.B., Melnikova V.I., Filippova A.I., Kobeleva E.A., Fomochkina A.S. December 27, 2023 Akitkan earthquake (mb = 5.4) in the zone of the marginal suture of the Siberian Platform // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2024. V. 60. No. 6. P. 1066–1079. doi:10.1134/S1069351324700885 (if=0.9, Q3 Scopus)
4. Чебров Д.В., Матвеев Е.А., Абубакиров И.Р., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Павлов В.М., Раевская А.А., Ромашева Е.И., Салтыков В.А., Сеньюков С.Л. Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г. ML=7.7, Mw=7.4 // *Землетрясения Северной Евразии*. 2024. Вып. 27 (2020). С. 289–300. doi:10.35540/1818-6254.2024.27.26 (РИНЦ, ВАК)
5. Molokova A.P., Skorkina A.A., Smirnov V.B. Spectral characteristics for earthquakes of Klyuchevskaya group of volcanoes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2024. V. 60. No 6. P. 1092–1104. doi: 10.1134/S1069351324700903 (if=0.9, Q3 Scopus)
6. Hohage T., Novikov R.G., Sivkin V.N. Phase retrieval and phaseless inverse scattering with background information // *Inverse Problems*. 2024. V, 40. 105007. doi:10.1088/1361-6420/ad6fc6 (if=2.0, Q1 Scopus)
7. Novikov R.G., Sharma B.L. Inverse source problem for discrete Helmholtz equation // *Inverse Problems*. 2024. V. 40. 105005. doi:10.1088/1361-6420/ad7054 (if=2.0, Q1 Scopus)
8. Новиков Р.Г. Голографическая теорема единственности // *Труды Математического института имени В.А. Стеклова*. 2024. Т. 325. С. 232–237. doi:10.4213/tm4388 (if=0.5, Q3 Scopus)
9. Shapoval A., Shnirman M. Explanation of flicker noise with the Bak-Tang-Wiesenfeld model of self-organized criticality // *Physical Review E*. 2024. V. 110. 014106. doi:10.1103/PhysRevE.110.014106 (if=2.2, Q1 Scopus)

10. Tadic B., Shapoval A., Shnirman M. Signatures of self-organized dynamics in rapidly driven critical sandpiles // *Physical Review E*. 2024. V. 110. No. 5. 054203. doi:10.1103/PhysRevE.110.054203 (if=2.2, Q1 Scopus)
11. Savostianov A., Shapoval A., Shnirman M. Impact of coupling on the road to synchronization of two coupled Van der Pol oscillators // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2024. V. 463. 134166. doi:10.1016/j.physd.2024.134166 (if=2.7, Q1 Scopus)
12. Filippova A.I., Burlakov I.S., Fomochkina A.S. Database of earthquake focal mechanisms for the East Arctic region // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2024. V. 60. No. 5. P. 960–972. doi:10.1134/S1069351324700873 (if=0.9, Q3 Scopus)
13. Gusiakov V.K., Beisel S.A., Gusev O.I., Lander A.V., Chebrov D.V., Chubarov L.B. Assessment of Tsunami Hazard for the Coast of Oktyabrsky Spit, Western Kamchatka Based on Results of Numerical Modeling // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2024. V. 18. P. 432–445. doi:10.1134/S0742046324700751 (if=0.7, Q3 Scopus)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Доклады на конференциях по теме НИР в 2024 г.

1. Filippova A.I. Seismic moment tensor: a review // XV International Conference and School «Problems of Geocosmos – 2024» (Saint-Petersburg, April 22–26, 2024): Abstracts. 2024. GC2024-SG005. <https://ucp.academy/events/GC2024/abstract/GC2024-SG005> (приглашенный доклад)
2. Молокова А.П., Скоркина А.А. Оценка моментных магнитуд для землетрясений Ключевской группы вулканов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. XVIII Международная сейсмологическая школа. Респ. Беларусь, г. Витебск, 9–13 сентября 2024 г. (устный доклад)
3. Zvereva A.S., Skorkina A.A. The relationship between M_w and other magnitude scales for earthquakes of the North Caucasus // XV International Conference and School «Problems of Geocosmos – 2024». Saint-Petersburg, April 22–26, 2024. (устный доклад)
4. Novikov R.G. A holographic uniqueness theorem // International Conference “Nonlocal and Nonlinear Problems”, Moscow, RUDN University, October 14–19, 2024. (устный доклад)
5. Grinevich P.G., Novikov R.G. Transparent scatterers and transmission eigenvalues // Days on Diffraction 2024, St. Petersburg Branch of the Steklov Mathematical Institute. June 10–14, 2024. (устный доклад)
6. Novikov R.G., Isaev M., Sabinin G., Goncharov F., Zaytsev R. Super-resolution reconstruction from band-limited Fourier transform // XVI international scientific conference and young scientist school "Theory and numerical methods for solving inverse and ill-posed problems" September 30 – October 2, 2024, Novosibirsk, Akademgorodok. (устный доклад)
7. Novikov R.G., Isaev M., Sabinin G., Goncharov F., Zaytsev R. Super-resolution reconstruction from band-limited Fourier and Hankel transforms // The 10th international conference «Quasilinear Equations, Inverse Problems and their Applications», October 17–21, 2024, Sochi, Educational Center «Sirius». (устный доклад)
8. Hohage T., Novikov R.G., Sivkin V.N., Phase retrieval and phaseless inverse scattering with background information // International Scientific Conference "Modern challenges of inverse problems" dedicated to the 70th anniversary of Professor Alemdar Hasanov Hasanoglu, October 3–5, 2024, Novosibirsk, Akademgorodok. (устный доклад)
9. Елаева М.С., Блантер Е.М., Шнирман М.Г. Асимметрия параметра порядка как основа прогноза событий десинхронизации в модели Курамото и солнечных индекса // Симпозиум "Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и

событий" ("ПРОЗНОЗ-2024"). ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк. 27–31 мая 2024 г. (устный доклад)

10. Кислов К.В. Fiber optics in geophysics. Distributed acoustic sensing (DAS) // XV школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса – 2024». Санкт-Петербург, Россия (April 22–26, 2024), 2024. GC2024-SG036. <https://ucp.academy/events/GC2024/abstract/GC2024-SG036> (приглашенный доклад)

11. Никитин С., Спиридонов Е., Бенгальский Д., Харасов Д., Ашкар Г., Костенко М., Кислов К.В., Наний О., Старовойт Ю., Трещиков В. Applications of fiber optical DAS equipment for teleseismic observations and tomography tasks in seismology // XV школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса – 2024». Санкт-Петербург, Россия (April 22–26, 2024), 2024. GC2024-SG067. <https://ucp.academy/events/GC2024/abstract/GC2024-SG067> (стендовый доклад)

12. Кислов К.В., Ашкар Г., Бенгальский Д., Гравиров В.В., Костенко М., Харасов Д., Васильев А., Трещиков В. Demonstration of the capabilities of Distributed Acoustic Sensing technology // XV школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса – 2024». Санкт-Петербург, Россия (April 22–26, 2024), 2024. GC2024-SG047. <https://ucp.academy/events/GC2024/abstract/GC2024-SG047> (стендовый доклад)

13. Ашкар Г., Бенгальский Д., Гравиров В.В., Кислов К.В., Костенко М., Котов А., Преснов Д., Спиридонов Е., Шуруп А. Full-Scale Testing of the Use of Distributed Acoustic Sensing (DAS) Technology to Determine Ice Cover Parameters // XV школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса – 2024». Санкт-Петербург, Россия (April 22–26, 2024), 2024. GC2024-SG013. <https://ucp.academy/events/GC2024/abstract/GC2024-SG013> (стендовый доклад)

14. Гравиров В.В., Кислов К.В. Advantages and Disadvantages of Distributed Acoustic Sensing Technology for Geophysics Tasks // XV школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса – 2024». Санкт-Петербург, Россия (April 22–26, 2024), 2024. GC2024-SG015. <https://ucp.academy/events/GC2024/abstract/GC2024-SG015> (стендовый доклад)

15. Кислов К.В., Дмитриенко М. Performance of Seismic Observations by DAS Technology in Different Environments // XV школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса – 2024». Санкт-Петербург, Россия (April 22–26, 2024), 2024. GC2024-SG042. <https://ucp.academy/events/GC2024/abstract/GC2024-SG042> (стендовый доклад)

16. Кислов К.В., Марченков А. Designing a side-by-side experiment to compare low-power impulsive artificial seismic sources // XV школа-конференция с международным

участием «Проблемы Геокосмоса – 2024». Санкт-Петербург, Россия (April 22–26, 2024), 2024. GC2024-SG044. <https://ucp.academy/events/GC2024/abstract/GC2024-SG044> (стендовый доклад)

17. Преснов Д.А., Ашкар Г.Х., Бенгальский Д.М., Гравиров В.В., Кнышов А.А., Костенко М.В., Котов А.Н., Неверов Б.В., Спиридонов Е.П., Шуруп А.С., Кислов К.В. Натурные испытания распределенного акустического сенсора (DAS) для мониторинга параметров ледового покрова // 66-я Всероссийская научная конференция МФТИ, МФТИ, Россия, 1–6 апреля 2024. (устный доклад)

18. Гравиров В.В., Кислов К.В. Применение технологии распределённого акустического зондирования в задачах вулканологии // Вулканизм и связанные с ним процессы. XXVII ежегодная научная конференция, посвящённая Дню вулканолога, 27-29 марта 2024 г., Петропавловск-Камчатский, Россия. 27–29 марта 2024. (стендовый доклад)

19. Филиппова А.И., Бурлаков И.С., Фомочкина А.И. База данных «Механизмы очагов землетрясений Восточной Арктики» // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. XVIII Международная сейсмологическая школа. Респ. Беларусь, г. Витебск, 9–13 сентября 2024 г. (стендовый доклад)

20. Бейзель С.А., Гусев О.И., Гусяков В.К., Ландер А.В., Чебров Д.В., Чубаров Л.Б. Некоторые результаты вероятностной оценки цунамиопасности Халактырского пляжа по результатам численного моделирования // V Всероссийская научная конференция с международным участием «ВОЛНЫ ЦУНАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ», 12–14 ноября 2024 г., Москва, ИО РАН. (устный доклад)

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Программы по теме НИР, зарегистрированные в 2024 г.

1. Гравиров В.В., Кислов К.В. Программа оценки качества функционирования систем сбора геофизической информации, работающих по протоколу miniseed // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688969 от 03 декабря 2024 г.