

Министерство науки и высшего образования
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ГИН СО РАН)

УДК 550.34 (551.14, 550.83.042)
Рег. № НИОКТР
AAAA-A16-116121550016-3

Инв. № 4

УТВЕРЖДЕНО
РЕШЕНИЕМ УЧЕНОГО СОВЕТА
Протокол № 10 от «17» декабря 2020г.
Председатель Ученого совета,
Врио директора института, д.г.-м.н.
А.А. Цыганков



ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Проект IX.136.2.2. Исследование факторов, определяющих закономерности развития сейсмического процесса и сейсмическую опасность Прибайкалья (заключительный)

Номер проекта в ИС управления НИР
0340-2019-0004

Приоритетное направление IX.136. Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий

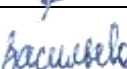
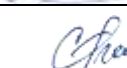
Программа IX.136.2. Тектонофизика современных геодинамических процессов как основа прогноза природных катастроф во внутриконтинентальных условиях

Научный руководитель
К.Г.-м.н.,


Ц.А. Тубанов

Улан-Удэ, 2020

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Должность	Подпись	ФИО
К.Г.-М.Н., зав. лаб.		Тубанов Ц.А.
Д.Г.-М.Н., В.Н.С. (0,4)		Мороз Ю.Ф.
Д.Г.-М.Н., С.Н.С.		Жатнуев Н.С.
К.Г.-М.Н., Н.С.		Цыдыпова Л.Р.
К.Т.Н., Н.С.		Базаров А.Д.
К.Г.-М.Н., Н.С.		Васильев В.И.
К.Г.-М.Н., Н.С.		Васильева Е.В.
К.Ф.-М.Н., М.Н.С. (0,5)		Добрынина А.А.
М.Н.С.		Бартанова С.В.
М.Н.С.		Предеин П.А.
вед. инженер (0,5)		Перевалов А.В.
инженер 2 кат (0,5)		Цыденов А.Б.
инженер 2 кат (0,4)		Толочко В.В.
инженер		Герман Е.И.
инженер 2 кат		Санжиева Д.П.-Д.
инженер 2 кат (0,9)		Санжиев Г.Д.
инж.-лаб.		Жигмытов Б.А.

РЕФЕРАТ

Отчет 37 с., 16 рис., 33 источн., 1 прил.

Ключевые слова: Байкальский рифт, сейсмичность, глубинное строение, метод приемных функций, затухание сейсмических волн, вибродиагностика зданий, мантийный флюид, моделирование.

Объектом исследования являются сейсмоактивные области Байкальского рифта и сопредельных территорий. Цель исследований — оценка направленности сейсмогенных процессов в очаговых зонах, характеристика факторов, определяющих закономерности развития сейсмического процесса и сейсмическую опасность.

По данным сети геофизических (сейсмических, геомагнитных, электромагнитных) наблюдений получены данные, характеризующие глубинное строение земной коры и мантии центральной части Байкальского рифта. С использованием метода функции приемника обменных волн построены глубинные скоростные разрезы. Выполнен анализ и геофизическая интерпретация многолетних электромагнитных и магнитовариационных наблюдений, проводившихся в регионе. Проведено исследование механизма затухания короткопериодных поперечных волн и коды в земной коре и верхней мантии. Построены детальные карты сейсмичности сейсмоактивных областей Центрального Байкала. С использованием уникального 100-тонного виброисточника выполнена экспериментальная верификация скоростных моделей строения земной коры. Предложен способ идентификации прочностных характеристик строительных конструкций на основе экспериментальных значений скорости деформационной волны и численного моделирования динамики зданий.

Полученные данные и разработанные методы обработки геофизических данных (метод приемной функции, инверсия магнитотеллурических полей, оценка добротности среды и расчет затухания по коде сейсмических волн, методы анализа вибрационных колебаний) актуальны для разработки геолого-геофизических основ прогноза сейсмической опасности.

Разработана модель эволюции мантийно-корового мигранта (магмо- и/или флюидозаполненной полости), учитывающая реологию среды и динамику теплопроводности. Комплексное моделирование процесса, включившее в себя как создание физической модели, так и химико-термодинамические расчеты изменения вещества мигранта и внешней среды, позволило описать подъем мантийного флюида из зоны аномальной мантии в Байкальской рифтовой зоне.

Опубликовано 34 статьи в рецензируемых журналах, получено 14 авторских свидетельств на программу для ЭВМ и 2 свидетельства на электронную базу данных.

Нормативные ссылки

Настоящий отчет о НИР составлен с использованием Государственного стандарта ГОСТ 7.32-2017.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение.....	6
Основные результаты.....	7
1. Исследование глубинного строения Байкальского рифта по данным комплексных геофизических наблюдений, включающих локальную сеть сейсмостанций, геомагнитные и электромагнитные пункты	7
2. Исследование сейсмичности центральной части БРЗ и западного Забайкалья. Разработка методов обработки сейсмических данных. Совершенствование методики инженерно-сейсмометрического мониторинга сейсмоустойчивости зданий.....	13
3. Изучение механизма миграции флюидов в мантийно-коровых условиях. Численное и экспериментальное моделирование эндогенных процессов	22
Заключение.....	26
Список использованной литературы.....	27
Приложение А. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в соответствии с государственным заданием	31

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий отчет является заключительным по теме: “Исследование факторов, определяющих закономерности развития сейсмического процесса и сейсмическую опасность Прибайкалья”, по которой были представлены промежуточные отчеты по этапам 2017, 2018, 2019 годов.

Задача прогноза сейсмической опасности является актуальной для территории Прибайкалья, особенно для областей с высокой плотностью населения и развитой инфраструктурой. Решение этой прикладной задачи невозможно без проведения фундаментальных исследований разработки геолого-геофизических основ прогноза землетрясений. Научный интерес представляет Байкальский рифт, где наиболее ярко проявились геодинамические процессы, выраженные высоким уровнем сейсмичности и аномалиями геофизических полей. Учитывая, что, в настоящее время в мировой практике, исследования в сейсмоактивных областях и вулканических зонах базируются на комплексном использовании различных геофизических методов (сейсмических, вибросейсмических электромагнитных), определена главная цель проекта — оценка направленности сейсмогенных процессов в очаговых зонах и идентификация сейсмоопасных структур на основе исследования глубинного строения и комплекса междисциплинарных геофизических наблюдений.

Содержание работы по проекту:

Исследование сейсмичности и глубинного строения Байкальского рифта по данным комплексных геофизических наблюдений, включающих локальную сеть сеймостанций, геомагнитные и электромагнитные пункты. Разработка методов обработки сейсмических данных. Совершенствование методики инженерно-сейсмометрического мониторинга сейсмоустойчивости и надежности зданий.

Изучение механизма миграции флюидов в мантийно-коровых условиях. Численное и экспериментальное моделирование эндогенных процессов.

Планируемый результат выполнения работы по проекту:

- Определены параметры, определяющие эволюцию физического состояния земной коры и очаговых зон землетрясений по данным геофизического мониторинга. Разработаны критерии, необходимые для разработки норм сейсмобезопасности и надежности зданий и сооружений.
- Разработана модель эволюции вещества вмещающих пород и флюида при его подъеме из мантии с учетом реологии среды (хрупко-пластичного состояния) с использованием физико-химического моделирования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1 Исследование глубинного строения Байкальского рифта по данным комплексных геофизических наблюдений, включающих локальную сеть сейсмостанций, геомагнитные и электромагнитные пункты

С использованием инверсии функций приемника построены одномерные скоростные разрезы (скорость распространения поперечных сейсмических волн в земной коре и подкоровом слое мантии) по данным отдельных сейсмостанций. Данные использованы при уточнении глубинной скоростной структуры южной окраины Сибирского кратона.

На основе накопленных данных сети широкополосных наблюдений (рис. 1) (работа ведется совместно с ИЗК СО РАН и БФ ФИЦ ЕГС РАН) апробирована методика функции приемника обменных волн [1, 2] для изучения глубинного строения рифтовой зоны и сопредельных территорий.

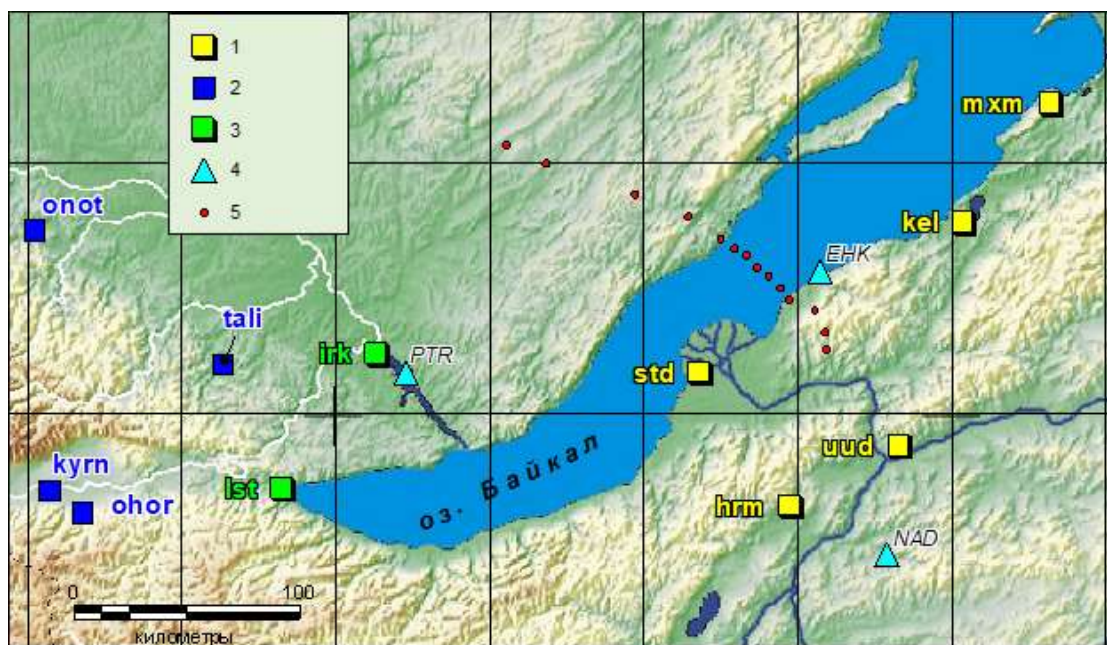


Рисунок 1 - Схема сети широкополосных сейсмологических и геомагнитных наблюдений. Широкополосные сенсоры, 1 - ГИН СО РАН; 2 – ИЗК СО РАН; 3 – БФ ФИЦ ЕГС РАН. 4-трехкомпонентные геомагнитные станции. 5 – профиль МТЗ [3]

Методика позволила получить сведения о структуре земной коры и верхней мантии, даже не имея плотной сети, восстанавливая скоростную структуру под каждой станцией отдельно. К текущему моменту рассчитаны продольные и поперечные приемные функции по 582 и 156 цифровым сейсмическим записям далеких землетрясений,

зарегистрированных на 5 широкополосных сейсмостанциях локальной сети – MXM, UUD, HRM, STD, KEL.

При обработке данных, нами использовано два основных алгоритма решения обратной задачи и обращения приемных функций обменных волн в скоростной разрез. Первый применяется для инверсии Р-функций приемника в скоростной разрез V_s до глубин 70 км и 280 км. Для инверсии используется апробированная программа (bip_sta), разработанная Г.Л. Косаревым [4]. Полученные скоростные разрезы дают представление о структуре земной коры и верхней мантии в подстанционной области и представляют собой обобщение нескольких десятков моделей, полученных при инверсии [5].

Результат в виде скоростных разрезов представлен на рисунке 2. Здесь по подобию функций определены азимутальные диапазоны имеющихся данных с однородной структурой. Для каждого диапазона инверсией приемных функций до глубины 70 км рассчитана скорость поперечных сейсмических волн, $V_s(h)$. Азимутальные стационарные модели по станции HRM вместе с моделями по 10 другим региональным станциям включены в скоростные разрезы вдоль профиля широтного направления, пересекающего контрастные тектонические структуры, результаты по которому представлены в статье [6].

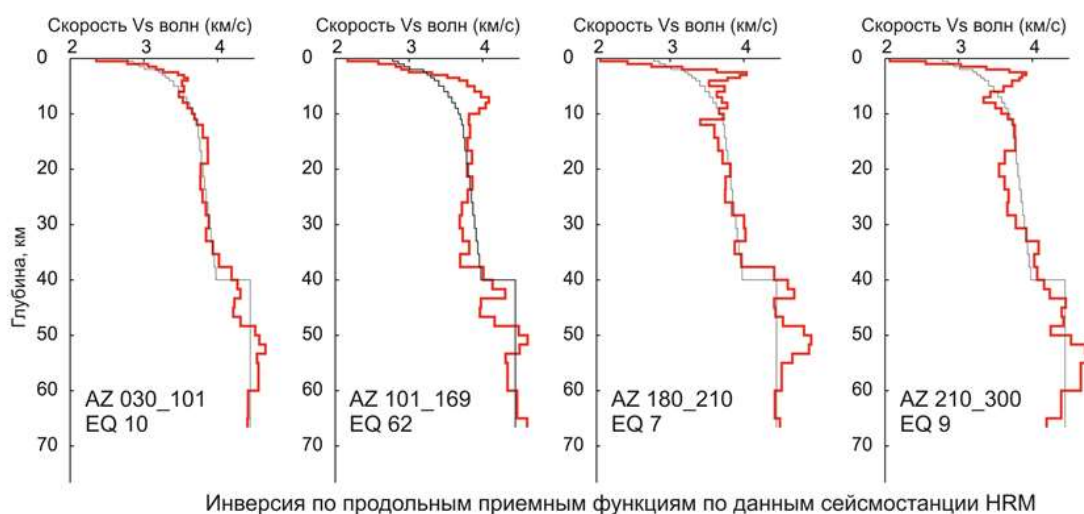


Рисунок 2 - Скоростные разрезы по данным сейсмостанции «Хурамша»

Второй способ построения скоростного строения основан на совместном обращении обменных волн P_s и S_p , что позволяет получать распределение скоростей V_p , V_s , V_p/V_s в земной коре и в верхней мантии до глубин 300 км.

Для широкополосных сейсмических станций локальной сети ГИН СО РАН получены приемные функции продольных и поперечных волн [7, 8] и выполнено их совместное обращение [1] в скоростные разрезы (рис. 3). Мощность коры в около

станционном пространстве достигает 40-45 км, что является промежуточным значением для БРЗ. В средней и нижней коре наблюдается высокое отношение скоростей V_p/V_s , которое на нескольких станциях превышает 2,0, что в целом не согласуется с данными ГСЗ. Предварительно высокие значения можно объяснить присутствием флюида с высоким поровым давлением. Сейсмическая граница литосфера-астеносфера проявляется падением скорости поперечных волн с глубиной от 4.5 км/с до 4.0 – 4.2 км/с. Характерное значение глубины границы литосфера-астеносфера составляет 70–90 км и понижение скорости поперечных волн в астеносфере достигает максимальных значений (около 10%). Результаты опубликованы [8].

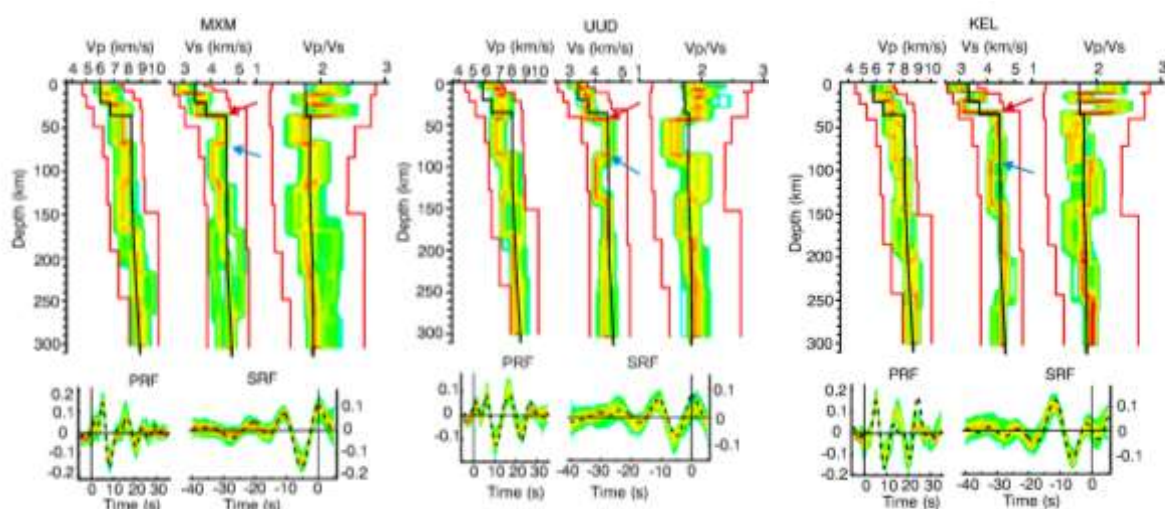


Рисунок 3 - Скоростные модели коры и мантии для станций UUD, MXM, и KEL (вверху), полученные совместным обращением приемных функций продольных и поперечных волн (внизу). Красные и синие стрелки показывают границу Мохо и границу литосфера – астеносфера (LAB)

По данным сети электромагнитных наблюдений выявлены эффекты в электромагнитном поле земли в связи с Култукским землетрясением на оз. Байкал. Рассмотрены результаты наблюдений вариаций горизонтальных и вертикальной составляющих электромагнитного поля Земли в 9 пунктах, расположенных вокруг южной части оз. Байкал. Наблюдения проводились по международному научно-техническому проекту «Камчатка и Байкал: электромагнитный мониторинг и поиск предвестников сильных землетрясений и извержений вулканов». По данным многолетних наблюдений, показано, что за 20 минут до землетрясения произошло затухание вариаций электрического поля с периодом в первые десятки секунд. Эффект является региональным и выражен в вариациях горизонтального магнитного поля. В электрическом поле эффект проявился в различной мере в пунктах наблюдений. Это связано с особенностью распределения электропроводности геологической среды, выявленной по данным МТЗ. В электрическом

поле внутриземных источников и в поведении электрического типпера выявлены бухтообразные аномалии, предвещающие и сопровождающие Култукское землетрясение. Аномалии по времени согласуются с подъёмом подземных вод в скважине. По результатам исследований подготовлена статья (Ю.Ф. Мороз, Т. Моги, Ц. А. Тубанов, П. А. Предеин).

Апробирована методика комплексирования данных геоэлектрики и сейсмотомографии, позволяющая более корректно судить о природе аномалий электропроводности и сейсмической скорости, связанных с наличием (отсутствием) флюида и пористостью среды.

Комплексирование данных геоэлектрики и сейсмотомографии позволяет более однозначно судить о природе аномалий электропроводности и сейсмической скорости. Это основано на различной разрешающей способности методов к пористости пород и наличию жидких флюидов. Электропроводность пород связана с наличием жидких флюидов, гальванически связанных между собой. Сейсмическая же скорость зависит от общей пористости, включающей также тупиковые и изолированные каналы. Совпадение аномалий повышенной электропроводности и пониженной скорости в земной коре при пористости не менее 15% свидетельствует о наличии в порах жидких флюидов. Аномалии повышенной электропроводности, не находящие подтверждения в пониженной скорости, характерны для пород с пористостью не более первых долей - первых единиц процентов, содержащих жидкие флюиды в гальванически связанном состоянии. Породы с такой пористостью находятся за пределами разрешающей способности сейсмотомографии. Аномалии пониженной скорости, не выраженные в повышенной электропроводности, указывают на преобладание в породах земной коры изолированных и тупиковых каналов с общей пористостью не менее 15%, которая может быть и без жидких флюидов [9].

Продолжена работа по анализу и интерпретации данных многолетних геомагнитных и магнитотеллурических наблюдений, проводившихся в регионе (рис. 4). Результаты предшествующих исследований [3, 10] показали направленность векторов вещественной части магнитного типпера вкост простирания БРЗ и различие на несколько порядков по величине электропроводности кривых МТЗ, ориентированных вдоль и поперек впадины, что указывает существенную трехмерность глубинного строения. Нами проведены расчеты выполнены для различных вариантов двумерной модели в диапазоне периодов от 1 до 10 000 секунд с помощью программы [11]. В первой пробной модели не получено удовлетворительное согласие экспериментальных и модельных кривых вещественной части магнитного типпера (см. рис. 4).

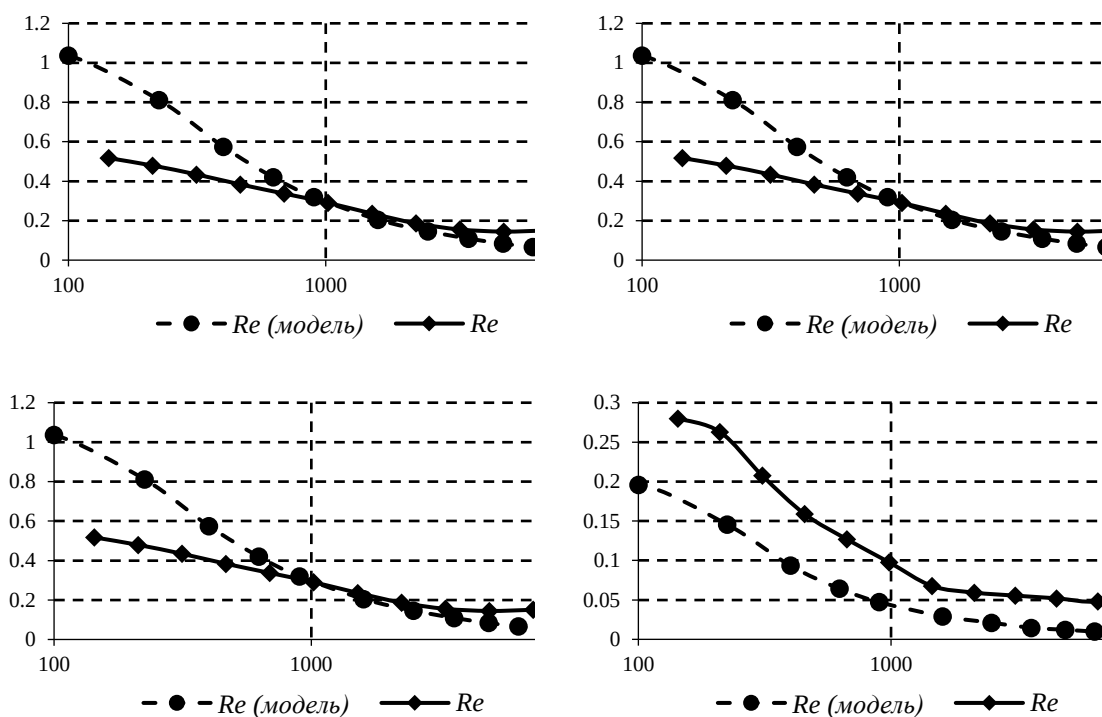


Рисунок 4 - Модуль вещественной части магнитного типпера (Re) согласно исходной модели осадочного чехла и экспериментальные значения в обсерватории Патроны (а) и пунктах Тырган (б), Энхалук (в), Надеино (г)

Для уточнения модели был введен коромантийный проводящий слой на глубине 35-50 км с удельным электрическим сопротивлением 10 Ом·м, в соответствии с двумерной моделью. Путем данного изменения получено удовлетворительное согласование с моделью в пунктах наблюдения близлежащих к оз. Байкал – в Тыргане и Энхалуке. Далее, с помощью введения в модель астеносферного слоя на глубине порядка 100 км с удельным электрическим сопротивлением 10 Ом·м, удалось несколько улучшить сходимость модели с экспериментальными данными по обс. Патроны на периодах 200-500 и 5000 сек, и для пункта Надеино на периодах больше 2000 сек.

Предположения о глубинных латеральных неоднородностях в дальнейшем могут проверены с привлечением численного трехмерного моделирования магнитотеллурического поля. Таким образом, существующая двумерная модель электропроводности Байкальской рифтовой зоны требует уточнения.

По результатам экспериментальных работ с использованием вибрационного источника ЦВ-100 выполнена верификация скоростных моделей строения земной коры, полученных ранее при проведении международных экспериментов BEST и PASSCAL. Проведена регистрация вибросейсмических сигналов на региональном профиле ВИБРО-ГСЗ протяженностью до 500 км малыми сейсмическими

группами (антеннами) с трехкомпонентными сейсмоприемниками (рис. 5). Использован уникальный 100-тонный вибросейсмический источник, расположенный в г. Бабушкин (Республика Бурятия). Разработано и апробировано специализированное программного обеспечение для выделения вибрационных зондирующих сигналов и пространственной селекции приходящих волн на больших расстояниях. Работы проведены совместно с ИВМиМГ СО РАН (Россия) и ИЦАГ АНМ (Монголия). Результаты опубликованы в [12].

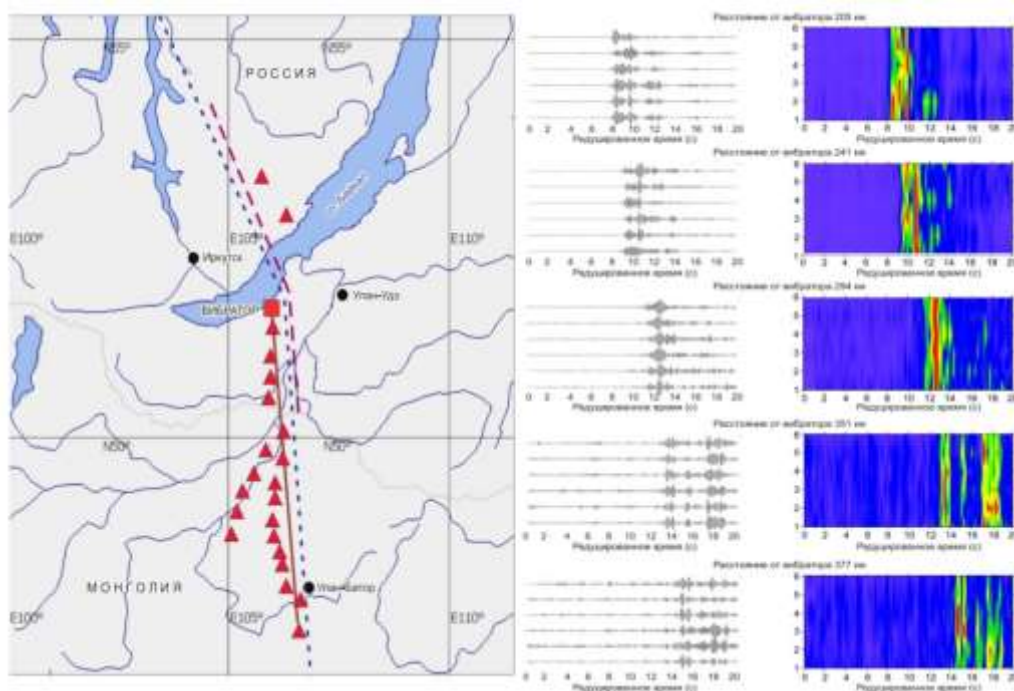


Рисунок 5 - Слева - 500-километровый профиль ВИБРО-ГСЗ - треугольники (Профиль BEST – пунктирная линия, профиль PASSCAL – точечная линия). Справа – вибрационные сейсмограммы и амплитудные спектрограммы, расстояние от источника ЦВО-100 – 205, 241, 294, 351 и 377 км.

2 Исследование сейсмичности центральной части БРЗ и западного Забайкалья. Разработка методов обработки сейсмических данных. Совершенствование методики инженерно-сейсмометрического мониторинга сейсмоустойчивости зданий

По данным каталога землетрясений ГИН СО РАН проведено исследование сейсмичности центральной части БРЗ ($106,1^{\circ}$ – $109,1^{\circ}$ в.д. и $51,7^{\circ}$ – $53,7^{\circ}$ с.ш.). За период 2001-2014 годы на исследуемой территории зарегистрировано более 21 тысячи землетрясений, из которых больше 95% имеют энергетический класс $K_p < 9$, произошло всего два события с энергетическим классом $K_p > 14$ (Максимихинское от 20.05.2008 и Туркинское от 16.07.2011) (рис. 6).

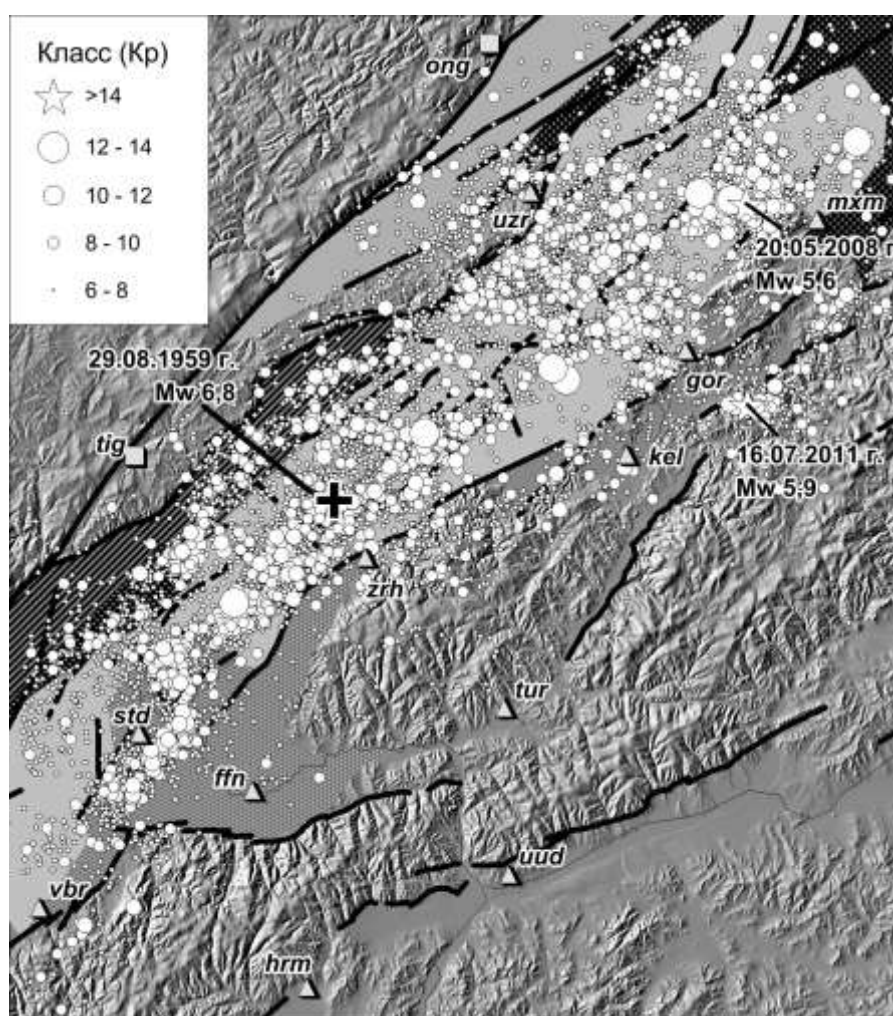


Рисунок 6 - Сейсмичность центральной части БРЗ за 2001- 2014 гг

По результатам многолетних работ составлена и зарегистрирована база данных [13]. Электронная база данных включает зарегистрированные цифровые сейсмограммы, обработанные данные (амплитуды, спектральные характеристики, времена пробега, типы

волн и качество вступлений, координаты гипоцентра, энергия в очаге), совместно с данными сети наблюдений (координаты сейсмостанций, параметры аппаратуры).

Исследованы пространственно-временные вариации сейсмического режима. Выявлены количественные (статистические) характеристики расположения очагов, пространственно приуроченные к основным тектоническим элементам Среднебайкальской котловины Байкала. Показано, что особенностью сейсмичности центральной части Байкальского рифта является локализация в пространственные кластеры. Апробированы различные способы формального выделения кластеров [14] по каталогу событий. Разработан алгоритм идентификации кластеров в 3-х мерном фазовом пространстве [15].

Группы классифицированы:

- а) по скорости протекания процесса - *медленно- и быстропротекающие* – по количеству землетрясений, произошедших за сутки;
- б) по количеству землетрясений в группе – *дуплеты, триплеты и мультиплеты*;
- в) по энергии землетрясений – *роевые*, в которых все землетрясения имеют примерно одинаковую энергию, *форшоковые*, когда одному-двум сильным землетрясениям предшествует последовательность более слабых землетрясений, отличающихся от основного толчка более чем на 1-2 класса, а также *афтершоковые* группы, когда последовательность с убывающей энергией землетрясений следует после сильного землетрясения. Результаты исследований представлены на конференциях и совещаниях.

Проведена детерминированная оценка характеристик излучения и распространения сейсмических волн, посредством моделирования акселерограмм зарегистрированных землетрясений. Полученные результаты актуальны для развития методики сейсмического районирования и имеют прикладное значение для оценки сейсмической опасности территорий Прибайкалья и Забайкалья.

Для оценки параметров колебаний поверхности при возможных в будущем сильных землетрясениях исследуются закономерности излучения и распространения сейсмических волн в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ). Региональные параметры излучения и распространения сейсмических волн оцениваются путем решения обратных задач стохастического моделирования акселерограмм землетрясений [16], зарегистрированных сейсмостанцией «Улан-Удэ».

Смоделированы акселерограммы наиболее сильных землетрясений ($M_W \sim 3.4-4.8$), происшедших в 2006-2011 годах, с эпицентрными расстояниями $\sim 96-125$ км, с глубинами очагов $\sim 8-12$ км (рис. 7). В расчетах использованы оценки добротности,

полученные ранее для данного района; оценки частотно-зависимого затухания и геометрического расхождения сделаны по данным о глубинном строении земной коры и верха мантии (скоростным профилям) в районе Улан-Удэ, и подобраны параметры, определяющие волновые формы и длительность акселерограмм [17]. Найденные параметры хорошо описывают все изученные землетрясения.

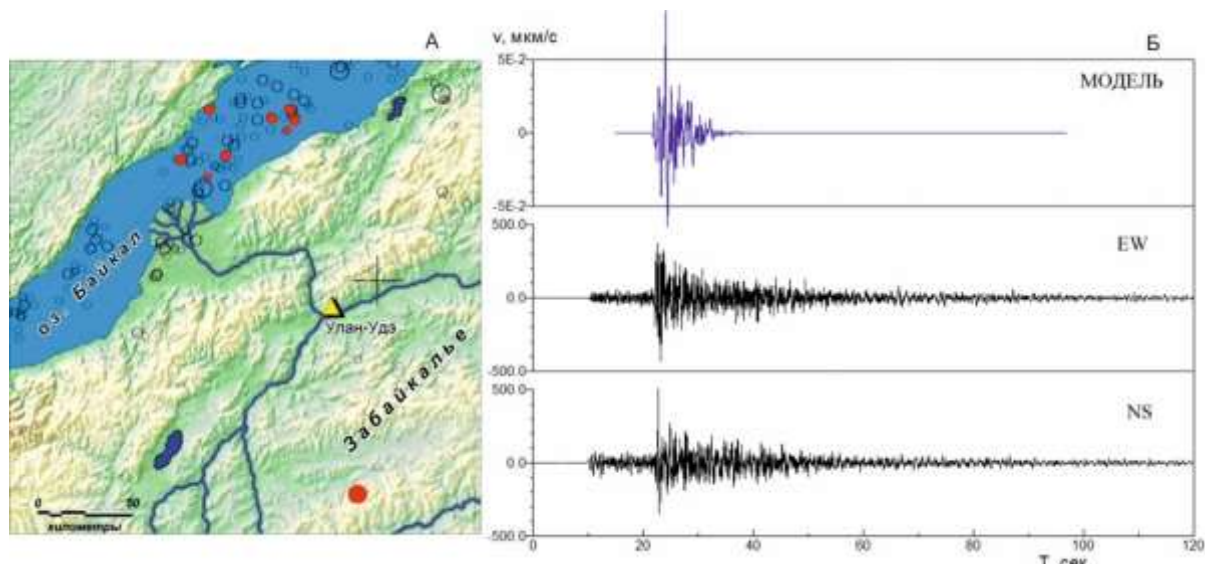


Рисунок 7 - А. Расположение очагов местных землетрясений, использованных для моделирования. Б. Смоделированная (синяя) и зарегистрированные велосигramмы землетрясения 01.02.2011 г., $M = 4.8$

В целом, удалось достичь достаточно хорошего согласия расчетов и наблюдений. Полученные региональные характеристики излучения и распространения сейсмических волн для Бурятии оказались близки к аналогичным характеристикам для районов Северного Кавказа и центральной Японии, вероятно потому что эти регионы имеют близкую структуру разломов земной коры и верха мантии. Оценки очаговых параметров напряжений $\Delta\sigma \sim 50$ бар для этих регионов оказались также близки. Полученные в настоящей работе оценки параметров излучения и распространения сейсмических волн можно использовать для прогноза параметров колебаний земной поверхности в районе Улан-Удэ при будущих сильных землетрясениях и для оценки сейсмической опасности в г. Улан-Удэ. По результатам исследований опубликована работа [18].

Получены детальные оценки затухания (Q^{-1}) сейсмических волн в земной коре и верхней мантии центральной части Байкальской рифтовой зоны. Для оценки Q использован метод нормализации к коде, дающий величину общего затухания. Для выделения отдельных компонент затухания использован метод инверсии огибающей коды. Проведено двумерное

картирование затухания сейсмических волн. Используемые методы позволяют по данным локальной сети сейсмических станций выявлять латеральные неоднородности разломно-блоковой сейсмоактивной среды.

Исследование динамических характеристик сейсмических волн землетрясений центральной части Байкальского рифта, одной из которых является затухание, является актуальным как для решения задач оценки сейсмической опасности (балльности) и изучения параметров очага землетрясений. Известно, что затухание сейсмических волн, помимо явления геометрического расхождения, вызвано явлениями рассеяния и поглощения: $Q_T^{-1} = Q_i^{-1} + Q_{SC}^{-1}$.

Поглощение также называют внутренним затуханием (intrinsic attenuation, Q_i^{-1}), а рассеяние (scattering, Q_{SC}^{-1}) связывают с перераспределением энергии в разных направлениях. Рассеяние является причиной появления сейсмической коды, вызванной некогерентными волнами, рассеянными на случайных неоднородностях в литосфере [19].

Для оценки величины общего затухания энергии сейсмических волн (Q_T^{-1}) использовался метод нормализации к коде [20], основанный на устранении влияния источника (механизма очага землетрясения) и локальных эффектов приемника путем нормировки спектральных амплитуд прямых и кода-волн. В работе [21] получены оценки сейсмической добротности по прямым продольным (Q_P) и поперечным волнам (Q_S), частотного параметра (n) дающего зависимость добротности от частоты, и коэффициента затухания (δ). Значения сейсмической добротности Q были получены для частотного диапазона 1–16 Гц, длина окна обработки коды составляла от 20 до 60 секунд. Выполнялась оценка разброса значения Q для различных эпицентральных расстояний и диапазонов энергетических классов землетрясений и других параметров модели: геометрического расхождения, длины окна обработки [22].

Для оценки затухания по кода-волнам (Q_C), дающего величину внутреннего поглощения, использовалась программа CODAQ из пакета SEISAN [23]. Использовались короткопериодные записи в частотном диапазоне от 1 до 16 Гц, эпицентральные расстояния от регистрирующих станций ограничены 250 км. Полученные значения добротности Q_C значительно варьируют в зависимости от частоты и длины окна обработки коды: с увеличением частоты и длины окна обработки добротность увеличивается, что можно интерпретировать как уменьшение затухания с увеличением глубины. Для полученных значений Q_C были определены эмпирические зависимости добротности от частоты согласно степенному закону [24]: $Q(f) = Q_0 \cdot f^n$, где Q_0 – добротность на референтной частоте f , n – частотный параметр.

Полученные результаты разделения общего затухания на компоненты достаточно сильно отличаются друг от друга для разных станций. К примеру, для станции Хурамша (HRMR), расположенной на плотных горных породах (рис. 8), основной вклад в общее затухание сейсмических волн дает внутреннее затухание Q_i^{-1} : 58–79% (рис. 9). Для станции Степной дворец (STDB), расположенной вблизи зоны влияния активного Дельтового разлома в районе дельты р. Селенги, характеризующейся также мощным осадочным покровом, толщина которого достигает нескольких километров [25], наблюдается более сложный механизм затухания сейсмических волн. Внутреннее поглощение Q_i^{-1} вносит незначительный вклад в затухание на низких частотах (≤ 1.5 Гц) — менее 10%, но преобладает для высоких частот, на частоте 3 Гц отмечается равный вклад обеих компонент в общее затухание сейсмических волн. При этом отмечается увеличение компоненты Q_{Sc}^{-1} для станции STDB относительно HRMR (Рис. 9–1а, б).

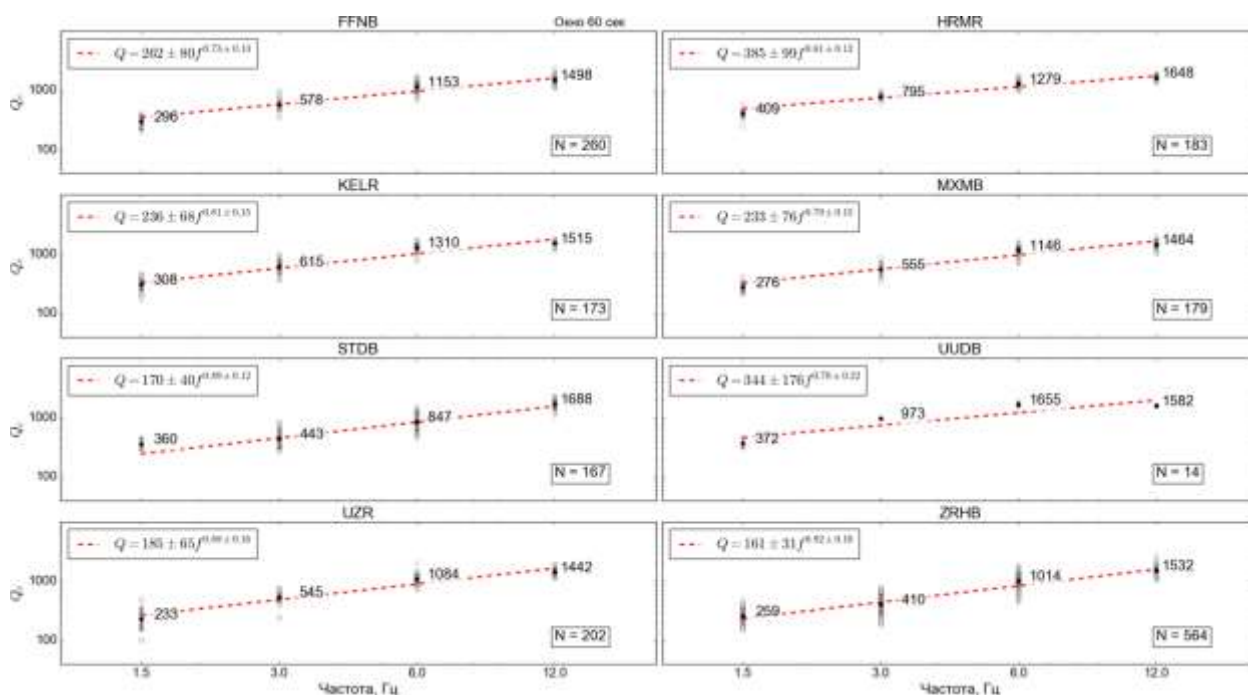


Рисунок 8 - Величины добротности Q_c для длины окна 60 секунд по 8 станциям. Показаны средние значения, с центральными частотами 1.5, 3, 6 и 12 Гц, зависимость добротности от частоты с величиной ошибки измерения, количество обработанных сейсмограмм по каждой станции.

Выделение отдельных компонент затухания осуществлялось с помощью метода инверсии огибающей сейсмической коды [26]. Разделение общего затухания на компоненты можно осуществить, зная механизм воздействия каждой компоненты на форму огибающей сейсмической коды сейсмограммы. В то время как однородное внутреннее затухание отвечает за экспоненциальное уменьшение огибающей сейсмической записи,

наиболее заметной характеристикой рассеяния является соотношение плотности потока энергии прямых и кода-волн.

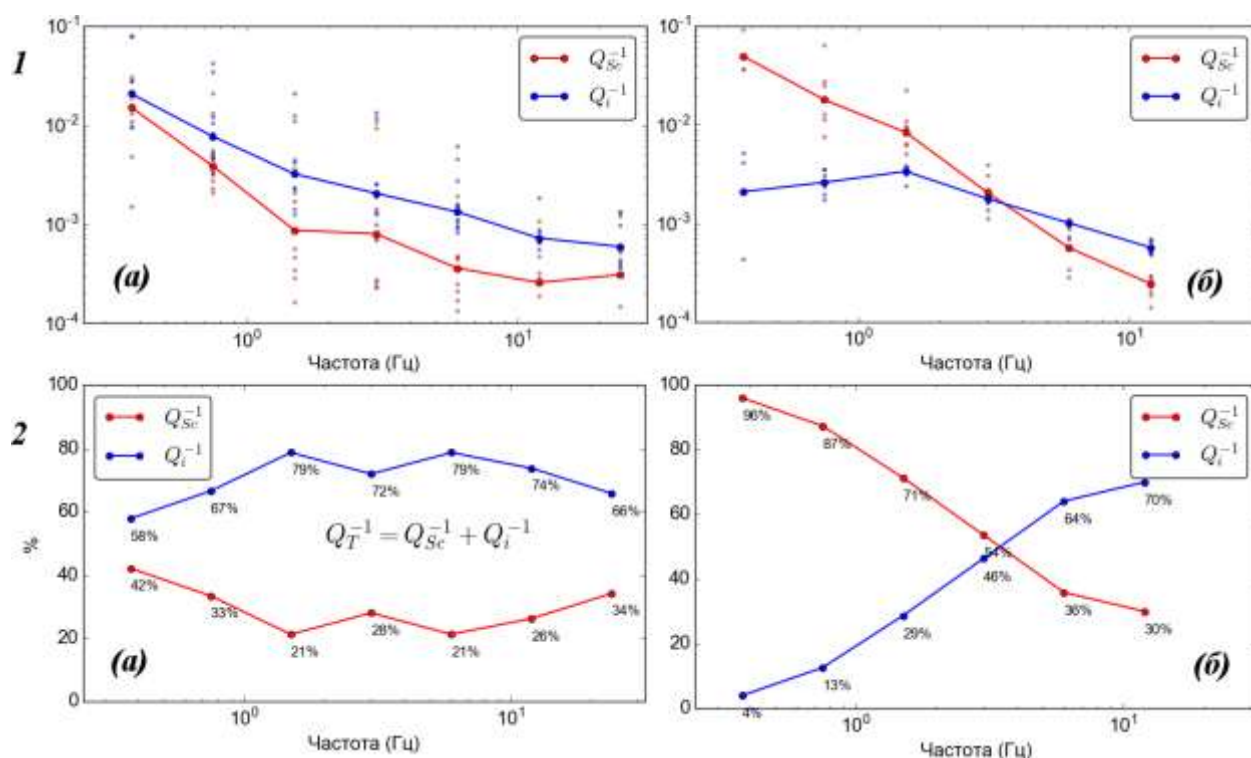


Рисунок 9 - Соотношение поглощения и рассеяния сейсмических волн. Абсолютные значения (**1**) и значения в процентах от общего затухания (**2**) для станции Хурамша (**а**) и Степной Дворец (**б**)

Сопоставление рассеяния на разных частотах с размерами неоднородностей в земной коре Байкальского рифта свидетельствует о затухании сейсмических волн на низких частотах за счет рассеяния на многочисленных разломах, в то время как на высоких частотах (6–12Гц) основное влияние на затухание оказывает поглощение в среде. Анализ вклада компонент Q_i^{-1} и Q_{sc}^{-1} для разных станций показал их зависимость от частотного диапазона и чувствительность к геологическим условиям в окрестностях станций: рассеяние сейсмических волн в районе дельты р. Селенги (станция Степной Дворец), характеризующейся мощным кайнозойским осадочным чехлом и наличием активных разломов, значительно превышает рассеяние в относительно плотных горных породах, слагающих Забайкальский блок (станция HRMR).

Пространственное двумерное картирование затухания сейсмических волн выполнено методом перекрывающихся эллипсов [24] (рис. 10). В основе метода лежит предположение, что значение затухания, полученное для пары «источник–приемник», характеризует не только трассу, а некоторый объем среды (эллипсоид), в фокусах которого расположены сейсмическая станция и землетрясение.

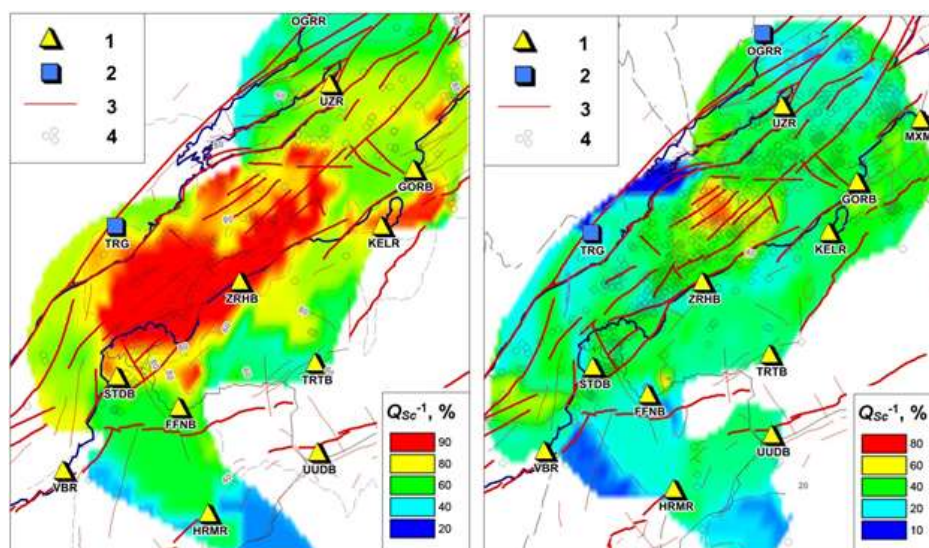


Рисунок 10 - Карта пространственного распределения рассеяния на неоднородностях среды (Q_{sc}^{-1}) в процентах от значения общего затухания (слева – для частоты 1,5 Гц, справа – для частоты 12 Гц). Показано расположение сейсмических станций, 1 – Бурятского филиала и, 2 – Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН; 3 – разломы, 4 – эпицентры землетрясений.

На примере новой для сейсмических районов серии многоэтажных зданий КУБ-2.5. построена математическая модель здания в пакете физического моделирования ANSYS с учетом экспериментальных динамических характеристик, полученных на основе инженерно-сейсмометрического исследования.

Оценка сейсмостойкости зданий и сооружений является достаточно сложной и многопараметрической задачей. Одними из основных показателей, по которым можно диагностировать интегральное состояние зданий и сооружений, являются параметры динамической реакции сооружений на возможное сейсмическое событие техногенного или естественного происхождения. В ходе НИР использованы результаты оценки сейсмостойкости 11-этажного железобетонного здания новой серии КУБ 2.5 (каркас унифицированный, безригельный) по данным интегральных динамических характеристик колебаний.

Исследование состояло из следующих этапов. 1 - оценка (измерение) динамических характеристик здания с использованием многоканального измерительного комплекса «Иркут» (разработка ГИН СО РАН). 2 - разработка модели здания в пакете физического моделирования ANSYS. 3 - валидация численной модели (проверка с данными экспериментальных измерений) с помощью полученных интегральных динамических характеристик колебаний. В «стартовой» численной модели здания были заданы типовые физико-механические характеристики несущих конструктивных элементов.

Сравнительный анализ численных и экспериментальных значений частот колебаний здания показал их существенное различие, что свидетельствовало о несоответствии используемых в расчетах типовых модельных параметров реальной ситуации. Таким образом, в результате проведенных работ, разработана методика инструментального научно-технического сопровождения новых объектов (в частности к которым относится здание серии КУБ 2.5), позволяющая производить валидацию существующих проектно-строительных решений.

На основе анализа инженерно-сейсмометрических наблюдений, сопоставление с данными численного моделирования предложен способ идентификации прочностных характеристик строительных конструкций на основе экспериментальных значений скорости деформационной волны и численного моделирования колебаний зданий (рис. 11).

Процедура идентификации динамических характеристик зданий и сооружений выполняется на основе сопоставлении вычисленных и натурных значений частот собственных колебаний и декремента затухания колебательных движений строительных конструкций [27].

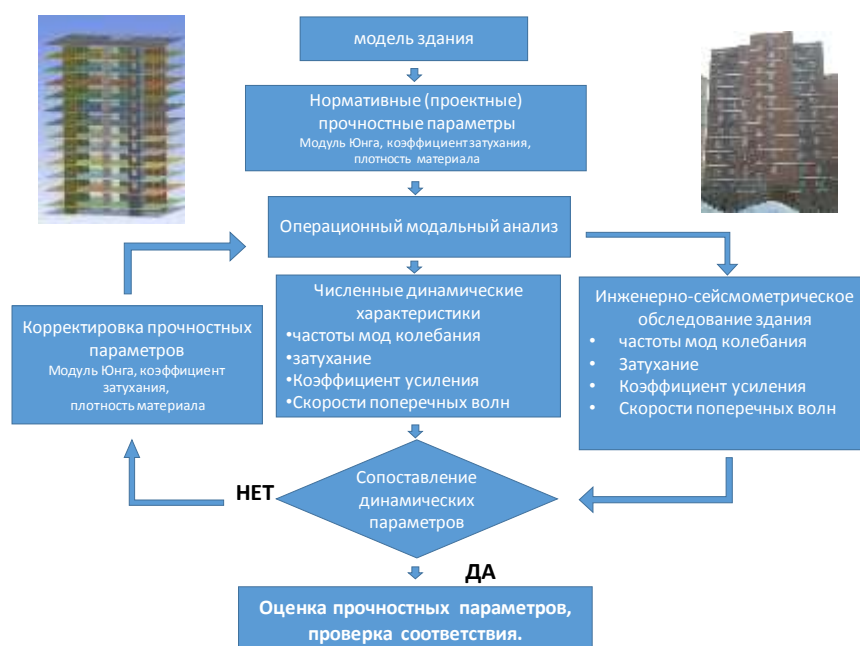


Рисунок 11 - Блок-схема процедуры идентификации прочностных параметров зданий и сооружений

С использованием способа, определена зависимость динамических характеристик сооружений от наличия второстепенных конструктивных элементов (кирпичное заполнение каркаса и перегородок). В этом случае измеренная частота наоборот завышается (фиксируется квадратичная зависимость от жесткости второстепенных неконструктивных

элементов), что приводит к завышенной оценке прочности здания по данным инструментальных обследований.

В результате модального анализа, сопоставления данных КЭ моделирования и натурного инженерно-сейсмометрического обследования высотного здания получено, что скорость распространения деформационных волн по высоте здания не зависит от наличия второстепенных (не несущих) конструктивных элементов (в отличие от таких параметров как частота и декремент затухания собственных колебаний мод колебаний). Это позволяет получить более реалистичные оценки жесткости строительной конструкции. Наличие численной КЭ модели позволяет варьировать характеристиками конструктивных элементов (например, жесткость перекрытий, наличие кирпичного заполнения – рис. 12) и в результате производить подбор динамических параметров, в том числе и скорости распространения деформационных волн для модели.

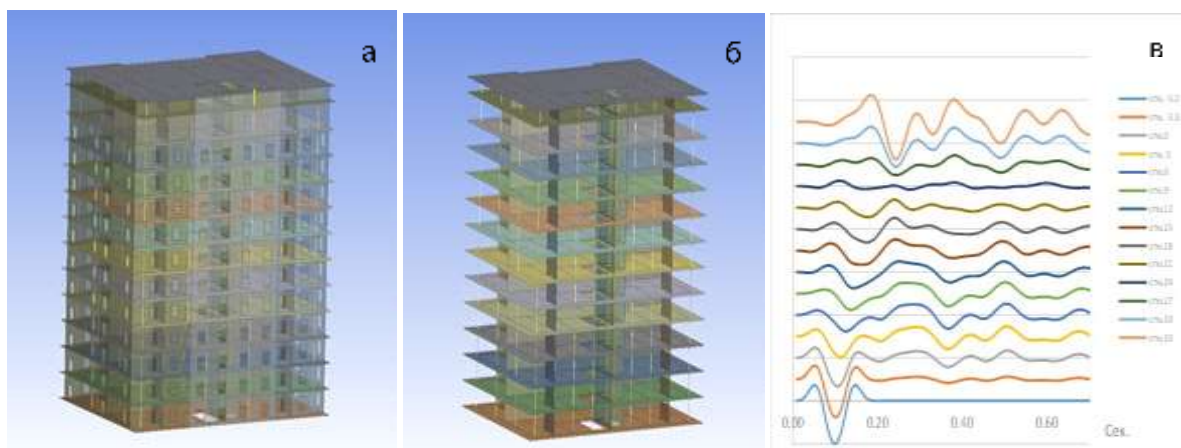


Рисунок 12 - а - модель здания с несущими элементами и кирпичным заполнением; б – модель только с несущими элементами; в - волновые формы распространения деформационных волн для модели

Таким образом способ идентификации прочностных параметров зданий и сооружений позволил выявить, что введение дополнительного волнового параметра позволяет, с одной стороны, однозначно рассчитать жесткость численной модели независимо от влияния второстепенных конструктивных элементов в здании (кирпичные перегородки и перемычки), с другой – провести инструментальные измерения этого параметра.

3 Изучение механизма миграции флюидов в мантийно-коровых условиях.

Численное и экспериментальное моделирование эндогенных процессов

Разработаны концептуальная и математическая модели образования и эволюции мантийно-корового мигранта (МКМ) как флюидозаполненной полости, учитывающие реологию среды и сейсмоденситные неоднородности профилей подъема (рис. 13). На глубине H под горизонтальным барьером с прочностью S за счёт привноса глубинного вещества формируется камера с пониженной плотностью D относительно плотности вмещающей среды R . В процессе формирования мощность камеры L растёт. Разность плотностей $(R - D)$ приводит к тому, что по достижению камерой критической мощности L избыточное давление в камере сравнивается с прочностью вышележащего барьера; в последнем происходит флюидоразрыв, и вещество камеры заполняет образовавшуюся вертикальную полость [28]. Образование МКМ контролируется следующим условием:

$$\int_0^{H+L} gR(H+L)d(H+L) - \int_0^H gRHdH - \int_H^{H+L} gDLdL \geq S, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения. В выражении (1) первые два члена в левой части – это литостатические давления внешней среды в подошве камеры и на прочностном барьере соответственно; третий член – гидростатическое давление в подошве камеры. Этим же уравнением контролируется возможность движения МКМ вверх на любой глубине.

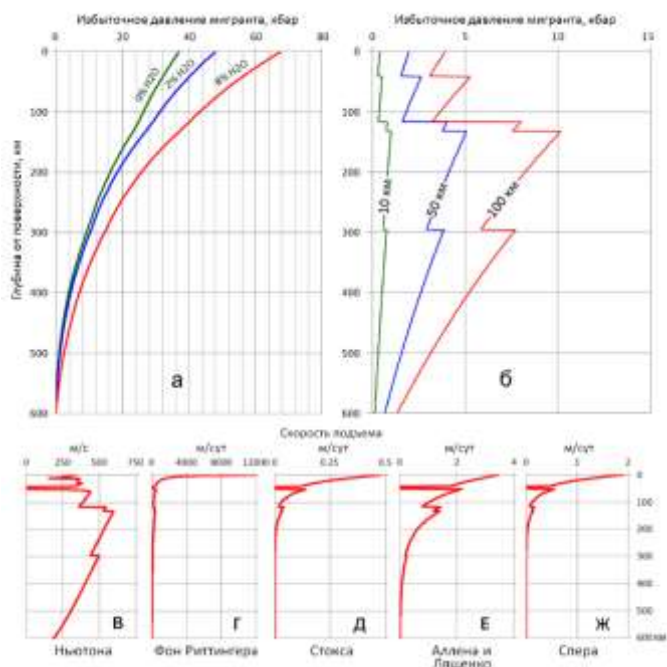


Рисунок 13 - Расчётные параметры эволюции МКМ. **а, б** – избыточные давления в МКМ от глубины 600 км: **а** – при исходной высоте МКМ, достаточной для прорыва на поверхность ($L > H$); **б** – при исходной высоте МКМ 10, 50 и 100 км ($L < H$); **в–ж** – профили

скоростей подъёма МКМ, рассчитанные по уравнениям: **в** – Ньютона; **г** – Фон Риттингера; **д** – Стокса; **е** – Аллена-Лященко; **ж** – Спера

Последовательно поднимающиеся мигранты формируют относительно стационарный трансмантийный поток (плюм) от слоя D'', взаимодействующий с мантией и прогревающий её от региональной геотермы до плюмовой адиабаты [29]. В основании прочной литосферы поток останавливается и распространяется по латерали, вызывая плавление с формированием магматических резервуаров, массово внедряющихся и изливающихся при достижении критических размеров (рис. 14).

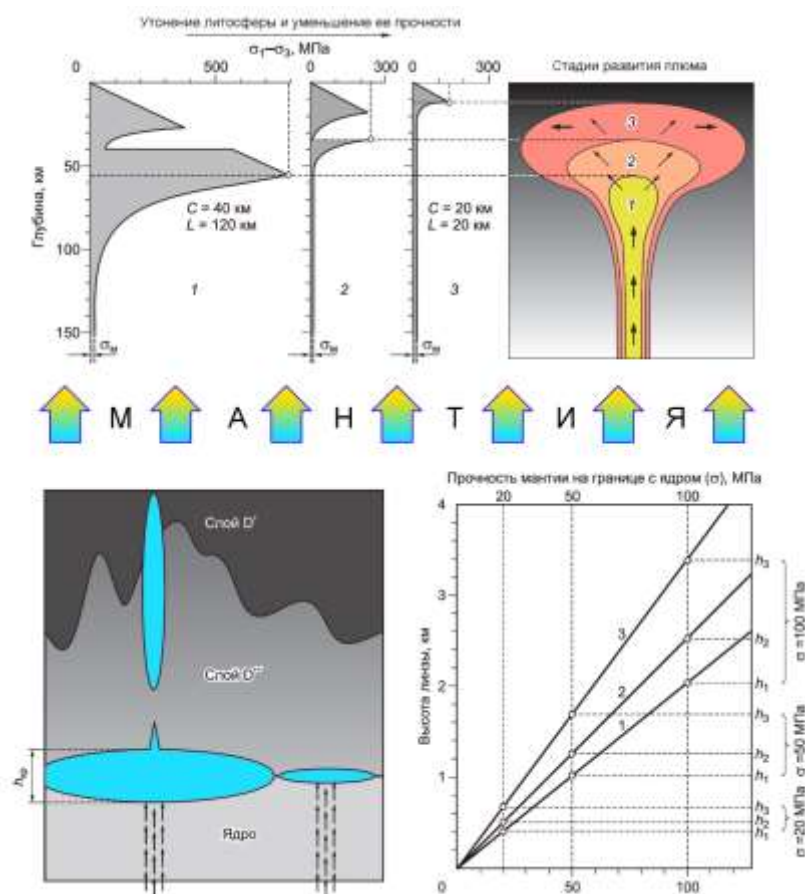


Рисунок 14 - Эволюция системы ядро–мантия–литосфера при формировании флюидных плюмов

Разработана численная физико-химическая модель влияния флюида зон субдукции на напряжённо-деформированное состояние среды и триггерные эффекты посредством фазовых переходов с разным содержанием воды, а также на залечивание сейсмических нарушений через флюидное плавление и кристаллизацию новых фаз при удалении флюида. Сейсмические события, во множестве регистрируемые на относительно небольших глубинах непосредственно вдоль погружающейся плиты [30] могут быть следствием масштабных фазовых переходов в «серпентиновой цепочке» [31]. Сейсмические события,

регистрируемые в мантийном клине, могут вызываться движением флюидозаполненных полостей с периодическими «накоплениями» под прочностными барьерами и прорывами в результате роста избыточного давления флюида. Хорошая повторяемость их в вытянутой вертикально и локализованной латерально области (сейсмические «гвозди» по [32]) может быть объяснена стационарностью субдукции (постоянством геометрического места фазовых переходов «серпентиновой цепочки» вдоль слэба), а также быстрым «залечиванием» путей подъёма полостей в результате химического взаимодействия флюида, магмы и вмещающей среды. Тектонофизические эксперименты на оптически активных средах (рис. 15) показали, что наибольшие векторы стрессового давления в зоне субдукции локализованы разнонаправленно во фронтальной и тыловой частях слэба и на глубинах в 2–2.5 мощности слэба могут превышать по своим значениям литостатическое давление в 3.2–3.5 раз. Повышенные тектонические давления, таким образом, достаточны для образования последовательно гидратированных высокобарических «алфавитных» фаз [33] в серпентин-форстеритовой цепочке при погружении слэба и последовательной гидратации мантийного вещества при равновесном подъёме водного флюида.



Рисунок 15 - Цифровой анализ нижних частей модельных слэбов (призм) до и после критической нагрузки. **А** – модельная призма с плотностью 0.998 г/см^3 и вязкостью 6.18×10^3 Пуаз. **В** – модельная призма с плотностью 0.890 г/см^3 и вязкостью 11.38×10^3 Пуаз. Чёрные отрезки показывают одни и те же векторы напряжений в модельной призме в спокойном состоянии и при погружении под действием груза, т.е. a трансформируется в a' ($a \rightarrow a'$), $b \rightarrow b'$, $c \rightarrow c'$ и $d \rightarrow d'$. Направления векторов сохраняются практически неизменными, что свидетельствует о равномерном распределении нагрузки в процессе эксперимента

Разработана методика единого процесса физико-геологического моделирования, включающая в себя две последовательные стадии: разработки специального прикладного программного обеспечения и моделирования на его базе эндогенных процессов. Методика опробована на создании комплекса программы для ЭВМ. На базе этих программ проведено моделирование теплофизической эволюции градиентной верхнемантийной и/или коровой среды над адиабатическим плюмом, последовательно развивающимся вверх с заданным шагом, кратным шагу дискретной сетки внешней среды. Получены вертикальные профили температур с переходами адиабаты–геотерма на различных уровнях задержки и латеральной эволюции плюма. Расчётные коэффициенты линейного теплового расширения

модельной среды коррелируются с усреднёнными по уровням прогоночными коэффициентами в неявной разностной схеме решения уравнения нестационарной теплопроводности методом конечных разностей и попадают в интервал 1.091×10^{-6} – $1.335 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (рис. 16).

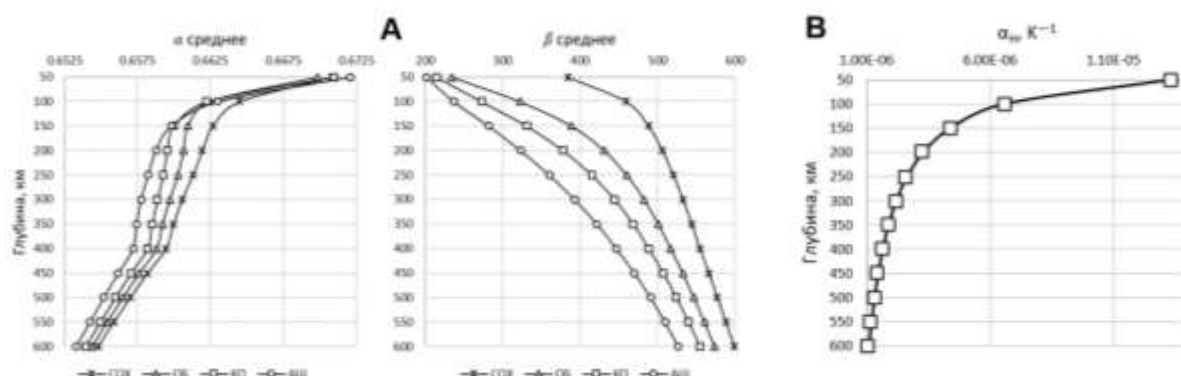


Рисунок 16 - Корреляция расчётных коэффициентов линейного теплового расширения с усреднёнными по модельным уровням прогоночными коэффициентами в неявной разностной схеме решения уравнения нестационарной теплопроводности методом конечных разностей. **А** – Усреднённые по уровням расчётные прогоночные коэффициенты α (слева) и β (справа) для разных геодинамических обстановок (срединно-океанических хребтов, океанических бассейнов, континентальных платформ и архейских щитов). **В** – расчётные коэффициенты линейного (вертикального) теплового расширения модельной среды

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчете по НИР в 2020 году представлены методы и заключительные результаты исследований по проекту проведенных в течение 2017 – 2020 годов.

В рамках работ по проекту продолжено исследование глубинного строения Байкальского рифта по данным комплексных геофизических наблюдений, включающих локальную сеть сейсмостанций, геомагнитные и электромагнитные пункты. В результате показана существенная пространственная неоднородность сейсмоактивной среды, определены параметры, определяющие эволюцию физического состояния земной коры и структуры очаговых зон землетрясений по данным геофизического мониторинга. Проведено детальное исследование сейсмического режима. На основе анализа инженерно-сейсмометрических наблюдений, сопоставление с данными численного моделирования предложен способ идентификации прочностных характеристик строительных конструкций на основе экспериментальных значений скорости деформационной волны и численного моделирования колебаний зданий. Актуальность разрабатываемой методики определяется необходимостью введения инструментального контроля проектирования современных высотных зданий в сейсмоопасных регионах.

Опубликовано статей, по геофизическому блоку проекта (Приложение А) в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах – 32 (23 – Web of science, Scopus); в сборниках конференций -80; получено объектов интеллектуальной собственности – 7.

Разработана концептуальная и математическая модель образования и эволюции мантийно-корового мигранта (магмо- и/или флюидозаполненной полости), учитывающая реологию среды и сейсмоплотностные неоднородности профилей подъема. Проведено комплексное моделирование процесса, включившее в себя как создание физической модели, так и химико-термодинамические расчеты изменения вещества мигранта и внешней среды, позволило описать подъем мантийного флюида из зоны аномальной мантии в зонах субдукции. Полученные результаты показали эффективность использования методов моделирования для анализа экспериментальных данных. Сопоставление и анализ разнородных данных исследования структуры и динамики земной коры и мантии БРЗ открывает новые возможности для экспериментального и теоретического изучения напряженно-деформированного состояния среды.

Опубликовано статей, по физико-химическому блоку проекта (Приложение А) в рецензируемых отечественных журналах – 2; в сборниках конференций -12; получено объектов интеллектуальной собственности – 9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мордвинова В.В., Дешам А., Дугармаа Т., Девершер Ж., Улзийбат М., Саньков В.А., Артемьев А.А., Перро Ж. Исследование скоростной структуры литосферы на Монголо-Байкальском трансекте 2003 по обменным SV-волнам // Физика Земли. - 2007. - №2. - С. 11-23.
2. Мордвинова В.В., Артемьев А.А. Трехмерная модель юга Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий по объемным волнам // Геология и геофизика. - 2010. - Т. 51(6). - С. 887-904.
3. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Глубинный геоэлектрический разрез Байкальского рифта // Вестник Камчатской региональной организации учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2012. – №20. – С. 114-126.
4. Kosarev G.L., Makeeva L.I., Vinnik L.P. Inversion of teleseismic P-wave particle motions for crustal structure in Fennoscandia // Physics of the Earth and Planetary Interiors. - 1987. - V. 47. - P. 11-24.
5. Мордвинова В.В., Кобелев М.М., Треусов А.В., Хритова М.А., Трынкова Д.С., Кобелева Е.А., Лухнева О.Ф. Глубинное строение переходной зоны Сибирская платформа – Центрально-Азиатский подвижный пояс по телесейсмическим данным // Геодинамика и тектонофизика. - 2016. - Т. 7. - №1. - С. 85-103.
6. Мордвинова В.В., Кобелев М.М., Хритова М.А., Турутанов Е.Х., Кобелева Е.А., Трынкова Д.С., Цыдыпова Л.Р. Глубинная скоростная структура южной окраины Сибирского кратона и Байкальский рифтогенез // Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 484. - №1. - С. 93-97.
7. Vinnik L.P. Detection of P to SV in the mantle // Physics of the Earth and Planetary Interiors. - 1977. - V. 15. - P. 39-45.
8. Винник Л.П., Орешин С.И., Цыдыпова Л.Р., Мордвинова В.В., Кобелев М.М., Хритова М.А., Тубанов Ц.А. Кора и мантия Байкальской рифтовой зоны по данным приемных функций продольных и поперечных волн // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – Т. 8. – №4. – С. 695-709.
9. Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. Глубинное строение Камчатки по результатам МТЗ и сейсмотомографии // Тихоокеанская геология. – 2017. – Т. 36. – № 5. – С. 44-58.
10. Мороз Ю.Ф., Татьков Г.И., Мороз Т.А., Тубанов Ц.А., Предеин П.А. Изменения геомагнитного поля и магнитного типпера в Байкальской рифтовой зоне // Геофизические исследования. – 2013. – Т. 14. – №3. – С.10-23.

11. Mackie R.L., Smith J.T., Madden T.R. Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example // *Radio Science*. – 1994. – V. 29. №.04. – P. 923-935.
12. Ковалевский В.В., Фатьянов А.Г., Караваев Д.А., Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Мордвинова В.В., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д. Исследование и верификация скоростных моделей земной коры методами математического моделирования и активной сейсмологии // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2019. – Т. 10. – № 3. – С. 569-583.
13. Санжиева Д. П.-Д., Предеин П. А., Тубанов Ц. А., Базаров А. Д. База сейсмологических данных Среднебайкальского района Байкальской рифтовой зоны за 2001-2013 гг. // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621509. Российская Федерация. /27.08.2019. - Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 3.
14. Mesimeri M., Karakostas V., Papadimitriou E., Tsaklidis G. Characteristics of earthquake clusters: Application to western Corinth Gulf (Greece) // *Tectonophysics*. – 2019. – v. 767. – 228160.
15. Герман Е.И., Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д., Цыдыпова Л.Р., Предеин П.А. Программа распознавания кластеров землетрясений в пространственно-временной области // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020666820. Российская Федерация. /16.12.2020. - Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 12.
16. Boore, D.M. Simulation of ground motion using the stochastic method, *Pure and Applied // Geophysics*. - 2003. – v. 160. – P. 635-676.
17. Павленко О.В. Характеристики поглощения сейсмических волн в коре и верхней мантии северного Кавказа // *Физика Земли*. – 2008. - № 6. – С. 52-60.
18. Павленко О.В., Тубанов Ц.А. Характеристики излучения и распространения сейсмических волн в Байкальской рифтовой зоне, оцененные посредством моделирования акселерограмм зарегистрированных землетрясений // *Физика Земли*. – 2017. - № 1. - С. 20-33.
19. Aki K., Chouet B. Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects // *Journal of geophysical research*. – 1975. – V. 80. – №. 23. – P. 3322-3342.
20. Predein P.A., Dobrynina A.A., Tubanov T.A., German E.I. CodaNorm: A software package for the body-wave attenuation calculation by the coda-normalization method // *SoftwareX*. – 2017. – V. 6. – P. 30-35.

21. Добрынина А.А., Предеин П.А., Саньков В.А., Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д., Горбунова Е.А. Пространственные вариации затухания сейсмических волн в Южнобайкальской впадине и прилегающих областях (Байкальский рифт) // Геодинамика и тектонофизика. – 2019. – Т. 10. – № 1. С. 147-166.
22. Добрынина А.А., Саньков В.А., Девершер Ж., Чечельницкий В.В. Факторы, влияющие на затухание сейсмических волн в литосфере в зонах континентального рифтогенеза // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – Т. 8. – № 1. – С. 107-133.
23. Havskov J., Ottemoller L. SEISAN earthquake analysis software // Seismological Research Letters. – 1999. – V. 70. – № 5. – P. 532-534.
24. Mitchell B. Regional variation and frequency dependence of Q_b in the crust of the United States / B. Mitchell // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1981. – V. 71. – P. 1531-1538.
25. Хатчинсон Д. Р., Гольмшток А. Ю., Зоненшайн Л. П. и др. Особенности строения осадочной толщи оз. Байкал по результатам многоканальной сейсмической съемки (1989 г.) // Геология и геофизика. – 1993. – Т. 34. – № 10-11. – С. 25-36.
26. Eulenfeld T., Wegler U. Measurement of intrinsic and scattering attenuation of shear waves in two sedimentary basins and comparison to crystalline sites in Germany // Geophysical Journal International. – 2016. – V. 205. – № 2. – P. 744-757.
27. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчет стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43. – № 2. – С. 192-207.
28. Васильев В.И., Васильева Е.В., Жатнуев Н.С., Санжиев Г.Д. Параметры образования и эволюции мантийно-корового мигранта // Геоинформатика. – 2019а. – №2. – С. 34–42.
29. Васильев В.И., Жатнуев Н.С., Васильева Е.В. Расчёт теплового возмущения термоградиентной среды при подъёме мантийно-корового мигранта // Геоинформатика. – 2019б – №4. – С. 46–53.
30. Yu Z., Zhao D., Niu X., Li J. Spatiotemporal distribution of low-frequency earthquakes in Southwest Japan: Evidence for fluid migration and magmatic activity // Journal of Asian Earth Sciences. – 2018. – N.151. – P. 148–172.
31. Васильев В.И., Жатнуев Н.С., Васильева Е.В. К проблеме глубинной дегитратации субдуцирующей плиты // Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал: Материалы V международной конференции. – Гремячинск, 2017. – С. 69–72.

32. Вадковский В.Н. Субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений – сейсмические «гвозди» // Вестник московского университета. Серия 4: Геология. – 2012. – Т. 4. – NZ1001.

33. Terasaki H., Fischer R.A. Deep Earth: Physics and chemistry of the lower mantle and core. – New Jersey: AGU & Wiley, 2016. – 312 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в соответствии с государственным заданием

Блок 1. Геофизический

Монография, учебное пособие

Kovalevsky V.V., Glinsky B.M., Khairtdinov V.S., Fatyanov A.G., Karavaev D.A., Braginskaya L.P., Grigoryuk A.P., Tubanov T.A. Active vibromonitoring: experimental systems and fieldwork results. Active Geophysical Monitoring, 2-d edition, Elsevier, 2020 pp. 43-65. **DOI:** 10.1016/B978-0-08-102684-7.00003-0. **ISBN** 978-008102684-7.

Sankov V.A., Dobrynina A.A. Active Faulting in the Earth's Crust of the Baikal Rift System Based on the Earthquake Focal Mechanisms. In: D'Amico S. (eds) Moment Tensor Solutions. Springer Natural Hazards. Springer, Cham. 2018. P. 599–618. **DOI:** 10.1007/978-3-319-77359-9_27. **ISBN** 978-3-319-77359-9.

Статья

Базаров А.Д., Лундэнбазар Б., Баранников В.Г. Результаты инженерно-сейсмометрического обследования 11-ти этажного здания серии КУБ-2,5 //Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. - 2018. - № 5. - С.23-27. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37090416>

Базаров А.Д., Лундэнбазар Б., Иванов И.А. Оценка динамических характеристик каркасного здания при воздействии техногенной вибрации //Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. - 2020. - Т.10. - № 1. - С.46–53. **DOI:** 10.21285/2227-2917-2020-1-46-53

Базаров А.Д., Лундэнбазар Б., Комаров А.К., Иванов И.А. Оценка динамической реакции каркасного здания под воздействием микросейсмического шума в г. Улан-Баторе //Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. - 2020. - Т. 10. - № 2. - С. 198-205. **DOI:** 10.21285/2227-2917-2020-2-198-205

Базаров А.Д., Лундэнбазар Б., Плотников А.Н. Валидация конечно-элементной модели здания с учетом скорости распространения поперечных волн //Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. - 2018. - №6. - С.20–24. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37090427>

Винник Л.П., Орешин С.И., Цыдыпова Л.Р., Кобелев М.М., Хритова М.А., Мордвинова В.В., Тубанов Ц.А. Кора и мантия Байкальской рифтовой зоны по данным приемных функций продольных и поперечных волн //Геодинамика и тектонофизика. - 2017. - Т. 8. - № 4. - С. 695-709. **DOI:** 10.5800/GT-2017-8-4-0313

Дергач П.А., Тубанов Ц.А., Юшин В.И., Дучков А.А. Особенности программной реализации алгоритмов низкочастотной деконволюции //Сейсмические приборы. - 2018. - Т. 54. - № 3. - С. 22-34. **DOI:** 10.21455/si2018.3-2

Добрынина А. А., Предеин П. А., Саньков В. А., Тубанов Ц. А., Санжиева Д. Д., Горбунова Е. А. Пространственные вариации затухания сейсмических волн в Южнобайкальской впадине и прилегающих областях (Байкальский рифт) //Геодинамика и тектонофизика. - 2019. - Т. 10. - №. 1. - С. 147-166. **https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-1-0408**

Добрынина А.А., В.А. Саньков, В.В. Чечельницкий, Цыдыпова Л.Р., Герман В.И. Сейсмоакустические эффекты Хубсугульского землетрясения 5 декабря 2014 г. с $M_w=4.9$ //Доклады Академии наук. – 2017. - № 6 (477). - С. 711-715. **DOI:** 10.1134/S1028334X17120248

Добрынина А.А., Саньков А.В., Шагун А.Н. Сезонные вариации амплитудно-частотных характеристик микросейсмических колебаний по данным сейсмических станций Байкальской сети //Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. - 2018. - Т. 41. - № 3. - С. 22–34. **DOI:** 10.21285/2541-9455-2018-41-3-22-34

Добрынина А.А., Саньков В.А., Чечельницкий В.В. Подземные ядерные взрывы в Восточной Сибири и республике Саха: предварительные результаты анализа сейсмограмм на основе данных байкальской сети сейсмических станций //Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан. - 2019. - № 2. - С. 21-27. **https://www.nnc.kz/media/bulletin/files/y2hDcn63zh.pdf**

Добрынина А.А., Саньков В.А., Девершер Ж., Чечельницкий В.В. Факторы, влияющие на затухание сейсмических волн в литосфере в зонах континентального рифтогенеза //Геодинамика и тектонофизика. - 2017. - Т. 8. - № 1. - С. 107-133. **DOI:**10.5800/GT-2017-8-1-0234

Ковалевский В.В., Фатьянов А.Г., Караваев Д.А., Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Мордвинова В.В., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д. Исследование и верификация скоростных моделей земной коры методами математического моделирования и активной сейсмологии //Геодинамика и тектонофизика. - 2019. - Т. 10. - № 3. - С. 569-583. **DOI:** 10.5800/GT-2019-10-3-0427

Лапердин В.К., Саньков В.А., Добрынина А.А. Сейсмогеодинамический фактор формирования селей на южных склонах хребта Кодар. //Геодинамика и тектонофизика – 2017. - Т. 8. - № 4. - С. 933-947. **DOI:** 10.5800/GT-2017-8-4-0325

Мордвинова В.В., Кобелев М.М., Хритова М.А., Турутанов Е.Х., Кобелева Е.А., Трынкова Д.С., Цыдыпова Л.Р. Глубинная скоростная структура южной окраины

Сибирского кратона и Байкальский рифтогенез //Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 484. - № 1. - С. 93-97. **DOI:** 10.31857/S0869-5652484193-97

Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. Глубинное строение Камчатки по результатам МТЗ и сейсмотомографии //Тихоокеанская геология. - 2017. - Т. 36. - № 5. - С. 44-58. http://itig.as.khb.ru/POG/2017_t36_n5.html

Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. О глубинном строении Южной Камчатки по геофизическим данным //Геодинамика и тектонофизика. - 2018. - Т. 9. - № 4. - С.1147-1161. **DOI:** 10.5800/GT-2018-9-4-0387

Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И., Логинов В.А., Улыбышев И.С. Глубинное строение Центрально-Камчатского прогиба по данным геоэлектрики и сейсмической томографии //Вулканология и сейсмология. - 2018. - № 6. - С. 42-56. **DOI:** 10.1134/S0203030618060068

Мороз Ю.Ф., Логинов В.А. Глубинная геоэлектрическая модель Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке //Вестник камчатской региональной организации учебно-научный центр. Науки о Земле. - 2019. - №2. - Вып. 42. - С. 9-24. **DOI:** 10.31431/1816-5524-2019-2-42-9-24

Мороз Ю.Ф., Логинов В.А. Глубинный геоэлектрический разрез Авачинско-Корякской зоны современного вулканизма на Камчатке //Доклады Академии наук. - 2018. - Т. 482. - № 6. - С. 713-717. **DOI:** 10.31857/S086956520002947-4

Мороз Ю.Ф., Логинов В.А., Улыбышев И.С. Глубинная геоэлектрическая модель Больше-Банной гидротермальной системы на Камчатке //Вулканология и сейсмология. - 2017. - № 5. - С. 51-61. **DOI:** 10.7868/S0203030617050042

Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М. О геоэлектрическом различии Курило-Камчатского и Беринговоморского сегментов Тихоокеанской зоны перехода //Геодинамика и тектонофизика. - 2018. - Т. 9. - № 2. - С. 489-501. **DOI:** 10.5800/GT-2018-9-2-0357

Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М. Особенности регионального и локального береговых эффектов в магнитотеллурическом поле Камчатки //Геофизические исследования. - 2017. - Т. 18. - № 3. - С.81-94. **DOI:** 10.21455/gr2017.3-7

Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М. Результаты двумерной инверсии данных магнитотеллурического зондирования по региональному профилю "Южный" (Камчатка) //Вестник камчатской региональной организации учебно-научный центр. Науки о Земле. - 2017. - №2. - Вып. 34. - С. 14-21. <http://www.kscnet.ru/journal/kraesc/issue/view/13>

Мороз Ю.Ф., Улыбышев И.С. О глубинной электропроводности районов Шанучского медно-никелевого и Агинского золоторудного месторождений на Камчатке //Вулканология и сейсмология. - 2018. - № 4. - С. 63-72. **DOI:** 10.1134/S0203030618040053

Павленко О.В., Тубанов Ц.А. Характеристики излучения и распространения сейсмических волн в Байкальской рифтовой зоне, оцененные посредством моделирования акселерограмм зарегистрированных землетрясений //Физика Земли. – 2017. - № 1. - С. 20-33. **DOI:** 10.1134/S1069351317010116

Саньков В.А., Парфеевец А.В., Мирошниченко А.И., Бызов Л.М., Лебедева М.А., Саньков А.В., Добрынина А.А., Коваленко С.Н. Позднекайнозойское разломообразование и напряженное состояние юго-восточной части Сибирской платформы //Геодинамика и тектонофизика. – 2017. - Т. 8. - № 1. - С. 81-105. **DOI:** 10.1134/S1069351317010116

Чечельницкий В.В., Макаров С.А., Добрынина А.А. Прохождение катастрофического водокаменного селя на реке Кынгарга (Республика Бурятия) 27–29 июня 2014 г. по сейсмическим данным //Доклады академии наук. - 2018. - Т. 481. - № 6. - С. 96-100. **DOI:** 10.31857/S086956520002107-0

Dobrynina, A.A., Sankov, V.A., Tsydypova, L.R., German, V.I., Chechelnitsky V.V., Ulzibat M. Hovsgol earthquake 5 December 2014, Mw=4.9: seismic and acoustic effects //Journal of Seismology. – 2017. - P.1-13. **DOI:** 10.1007/s10950-017-9711-z

Dobrynina, A.A., Sankov, V.A., Tsydypova, L.R., German, V.I., Chechelnitsky V.V., Ulzibat M. Reply to the comment by Alexander G. Sorokin, Anatoly V. Klyuchevskii on "Hovsgol earthquake 5 December 2014, MW=4.9: seismic and acoustic effects" by Anna A. Dobrynina, Vladimir A. Sankov, Larisa R. Tsydypova, Victor I. German, Vladimir V. Chechelnitsky, Ulzibat Munkhuu. Journal of Seismology. - 2020. - V. 24. - P. 1297-1305/ **DOI:** 10.1007/s10950-020-09946-z

German E. I., Thydypov Sh. B. Recognition of the Crystal Structure Clusters in Fast-Cooled Amorphous Medium //Solid State Phenomen. - 2020. - Vol. 310. - PP. 140-144. **DOI:** 10.4028/www.scientific.net/SSP.310.140

German E.I., Tsydypov Sh.B., Damdinov B.B. Calculation of Argon Compressibility at Different Cooling Rates //High Temperature. - 2019. - Vol. 57. - No. 1. - P. 27-31. **DOI:** 10.1134/S0018151X19010115

Predein P.A., Dobrynina A.A., Tubanov T.A., German E.I. CodaNorm: A software package for the body-wave attenuation calculation by the coda-normalization method //SoftwareX. - 2017. - V. 6. - P. 30-35. **DOI:** 10.1016/j.softx.2016.12.004

Патенты, свидетельства

Базаров А.Д. GeoGPR- программа обработки георадарных данных // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017663511, Российская Федерация. /06.12.2017.

Базаров А.Д. Geoseism-программа обработки сейсмических данных //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618287. Российская Федерация. /27.06.2019. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 3.

Базаров А.Д. Динамические характеристики строительных конструкций Республики Бурятия //Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2018621104. Российская Федерация. /18.07.2018. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 7.

Герман Е.И., Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д., Цыдыпова Л.Р., Предеин П.А. Программа распознавания кластеров землетрясений в пространственно-временной области // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666820. Российская Федерация. /16.12.2020. - Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 12.

Предеин П.А., Добрынина А.А., Тубанов Ц.А. GEnvelope – программа для расчета параметров затухания сейсмических волн методом огибающей коды //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018613010. Российская Федерация /01.03.2018. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 3.

Предеин П.А., Тубанов Ц.А. "NoiseCalibration: Программа для калибровки сейсмометров методом эталонного канала" //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020662114. Российская Федерация. /08.10.2020. - Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем».

Санжиева Д.П.-Д., Предеин П.А., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д. База сейсмологических данных Среднебайкальского района Байкальской рифтовой зоны за 2001-2013 гг. //Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2019621509. Российская Федерация /27.08.2019. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 3.

Блок 2. Физико-химический

Статья

Васильев В.И., Васильева Е.В., Жатнуев Н.С., Санжиев Г.Д. Параметры образования и эволюции мантийно-корового мигранта //Геоинформатика, - 2019. - №2. - С. 34-42. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38165528>

Васильев В.И., Жатнуев Н.С., Васильева Е.В. Расчёт теплового возмущения термоградиентной среды при подъёме мантийно-корового мигранта //Геоинформатика. - 2019. - №4. - С. 46-53. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41522474>

Патенты, свидетельства

Васильев В.И. Vladi Collision – программа моделирования коллизии литосферных плит //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664801. Российская Федерация. /22.11.2018. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 12.

Васильев В.И. Vladi DiffMelt - программа для расчетов баланса масс в магматических системах //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666449. Российская федерация. /09.12.2020. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 12.

Васильев В.И. Vladi DisTerm – программа для двумерного моделирования теплового возмущения термоградиентной среды при внедрении магматического мигранта //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617548. Российская федерация. /17.06.2019. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 6.

Васильев В.И. Vladi Joint – программа для статистического моделирования поведения систем случайных поднимающихся флюидозаполненных трещин (полостей) в пластичной среде //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613716. Российская Федерация. /21.03.2019. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 4.

Васильев В.И. Vladi Migrant - программа для расчёта физических параметров при неизохорном подъёме мантийно-корового мигранта в нижней и верхней мантии и земной коре //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020665451. Российская федерация. /27.11.2020. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 12.

Васильев В.И. Vladi NumGraph - программа для цифровой интерпретации фоторезультатов тектонофизических экспериментов по исследованию напряжений в оптически активных средах //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666450. Российская федерация. /09.12.2020. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 12.

Васильев В.И., Васильева Е.В., Жатнуев Н.С. Vladi OverPressure – программа для параметрического моделирования образования и эволюции мантийно-корового мигранта //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613814. Российская Федерация. /22.03.2019. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 4.

Васильев В.И., Жатнуев Н.С., Васильева Е.В. Vladi Distat – программа для расчёта двумерных распределений физических полей и вязкости земной коры //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664295. Российская Федерация. /14.11.2018. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 11.

Васильев В.И., Жатнуев Н.С., Васильева Е.В. Vladi Gead – программа для теплофизических расчётов в диапазоне плюмовая адиабата – региональная геотерма //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667677. Российская Федерация /26.12.2019 – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 1.