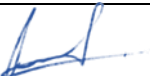
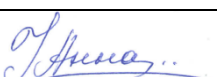
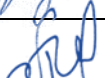
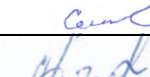


Улан-Удэ, 2019

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. (0,8)		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.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Реферат	1
Нормативные ссылки	2
Введение	2
Основные результаты.....	3
1. Изучение особенностей сейсмичности и разломно-блокового строения очаговых областей Байкальского рифта	3
2. Разработка критериев оценки сейсмобезопасности и надежности зданий и сооружений.....	17
3. Моделирование пространственно-временной эволюции глубинного флюида и вмещающей среды в литосфере БРЗ.....	19
Заключение	26
Список использованной литературы	27
Приложение	30

РЕФЕРАТ

Отчет 32 с., 17 рис., 32 источн., 1 прил.

БАЙКАЛЬСКИЙ РИФТ, ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ, МЕТОД ПРИЕМНЫХ ФУНКЦИЙ, ЗАТУХАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН, ВИБРОДИАГНОСТИКА ЗДАНИЙ, МАНТИЙНЫЙ ФЛЮИД, МОДЕЛИРОВАНИЕ

Объектом исследования являются сейсмоопасные области Байкальского рифта и сопредельных территорий. Цель работ по проекту — оценка направленности сейсмогенных процессов в очаговых зонах и идентификация наиболее сейсмоопасных структур. Методология исследований подразумевает использование данных комплексных геофизических наблюдений, включающих локальную сеть сеймостанций, проведение математического и физического моделирования. В отчетном году решались задачи методического характера, связанные с обработкой и интерпретацией экспериментальных данных.

Нами в рамках проекта проведено детальное исследование механизма затухания короткопериодных поперечных S-волн и коды в земной коре и верхней мантии. Построены карты сейсмической добротности и коэффициента затухания для разных частотных диапазонов, которые показывают проявление дробной структуры поля затухания на более высоких частотах. Полученные данные и используемые методы интерпретации (метод приемной функции, картирование сейсмичности и параметров сейсмических волн) актуальны для разработки геолого-геофизических основ прогноза сейсмической опасности.

Предложен способ идентификации прочностных характеристик строительных конструкций на основе экспериментальных значений скорости деформационной волны и численного моделирования динамики зданий. Введение нового дополнительного волнового параметра повышает однозначность теоретических расчетов жесткости численной модели, независимо от влияния второстепенных конструктивных элементов здания, с возможностью инструментального контроля этой характеристики на реальном объекте.

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.

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

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

ВВЕДЕНИЕ

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 наиболее сейсмоопасных структур на основе исследования глубинного строения и комплекса междисциплинарных геофизических наблюдений.

Содержание работы в 2019 г. по проекту:

Изучение особенностей сейсмичности и разломно-блокового строения очаговых областей Байкальского рифта.

Разработка критериев оценки сейсмобезопасности и надежности зданий и сооружений.

Моделирование пространственно-временной эволюции глубинного флюида и вмещающей среды в литосфере БРЗ.

Планируемый результат выполнения работы в 2019 г. по проекту:

- Параметры, определяющие эволюцию физического состояния земной коры и очаговых зон землетрясений по данным геофизического мониторинга.
- Критерии, необходимые для разработки норм сейсмобезопасности и надежности зданий и сооружений.
- Модель эволюции вещества вмещающих пород и флюида при его подъеме из

мантии с учетом реологии среды (хрупко-пластичного состояния) и сейсмоплотностных неоднородностей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Изучение особенностей сейсмичности и разломно-блокового строения очаговых областей Байкальского рифта

Показано, что на территории Западного Забайкалья, контактирующей с Байкальским сейсмическим поясом, сейсмическую опасность представляют не только транзитные сотрясения, но и местные сильные землетрясения, очаги которых формируются в отличном от БРЗ сеймотектоническом деформационном режиме. Проведены детальные исследования сейсмического режима и глубинного строения в течение длительного времени при помощи расстановки автоматизированных цифровых сейсмостанций в центральной части Байкальского рифта.

1.1. Сейсмичность Западного Забайкалья

Территория Западного Забайкалья, непосредственно примыкает к впадине оз. Байкал с юга и востока и в геодинамическом отношении составляет периферию Байкальского сейсмического пояса. Сейсмический режим этого района обусловлен характером новейших тектонических движений, присущих Забайкальской области умеренного горообразования и геодинамическими процессами, протекающими в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) в целом. Из трех крупных геотектонических провинций: Сибирской платформы, Байкальской рифтовой зоны и Западного Забайкалья, последнее значительно уступает БРЗ по интенсивности тектонического и сейсмического процесса.

Вместе с тем, эффекты от сильных землетрясений БРЗ ($M \geq 5$), в том числе ее юго-западного и северо-восточного флангов, а также Северной Монголии, могут представлять весьма существенную опасность для территории Забайкалья. Чаще всего ощутимые сотрясения здесь имеют транзитный характер.

При оценке сейсмической опасности сейсмоактивных регионов наибольшей информативностью, безусловно, характеризуются сильные землетрясения ($M \geq 5.0$). Отметим, что заметные сейсмические события в Западном Забайкалье, характеризующемся собственной умеренной сейсмической активностью, возникают достаточно редко. Тем не менее, на рассматриваемой территории возможны относительно сильные землетрясения, способные причинить материальный ущерб расположенным вблизи эпицентра населенным пунктам.

В качестве сравнительно недавних примеров можно привести Оронгойское землетрясение 2 октября 1980 г. ($M_S=5.1$) [1], и Заганское землетрясение 1 февраля 2011 г.

($M_b=4.7$). Кроме того, на основе имеющихся исторических данных в Западном Забайкалье определены эпицентры нескольких событий XIX века [2] (рис. 1).

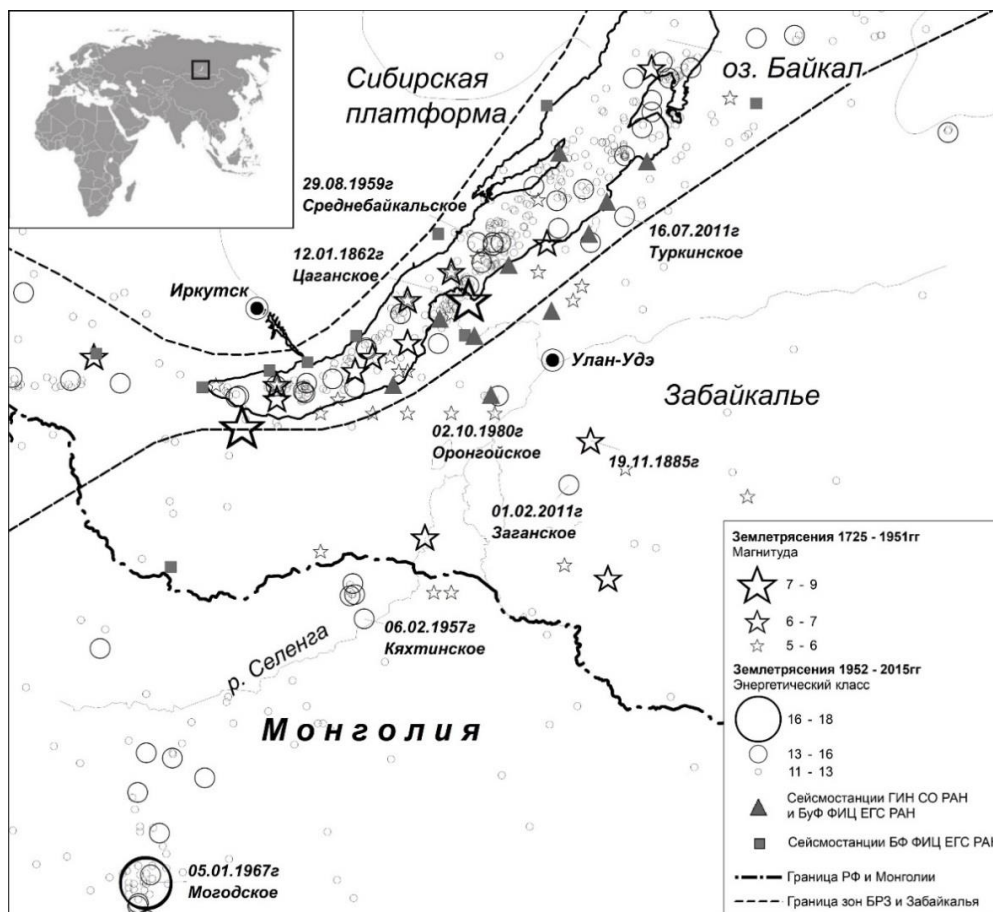


Рисунок 1 – Карта эпицентров землетрясений территории Байкальской рифтовой зоны и Забайкалья.

К наиболее сильным землетрясениям ($M=6.6-7.5$) исторического и инструментального периодов наблюдений в рассматриваемом районе относятся землетрясения в Южном и Центральном Байкале. При этом максимальными по магнитуде являются Цаганское (12.01.1862 г. в 07h19m с $M=7.5$) и Среднебайкальское (29.08.1959 г; $MLH=6.8$) землетрясения, которые приурочены к району дельты р. Селенги [2]. В частности, в г. Улан-Удэ именно эти два землетрясения проявились здесь с наибольшей интенсивностью (7 баллов).

В целом, район дельты р. Селенги, очевидно, следует считать наиболее опасным для территории г. Улан-Удэ в аспекте возможных сейсмических воздействий (магнитудный потенциал активных структур Среднего Байкала достигает значений $M_{max}=7.5$ [3], особенно с учетом сравнительно небольших эпицентральных расстояний (80–100 км).

Согласно картам ОСР-А и ОСР-В, предназначенным для массового гражданского строительства, территория г. Улан-Удэ расположена в пределах зоны 8-балльных сотрясений с периодами повторяемости 500 и 1000 лет соответственно [4]. Магнитудный потенциал активных разломов на территории Западного Забайкалья достигает $M_{\max}=6.5$.

В случае возникновения землетрясения с $M \leq 6$, с эпицентром, близким к городу ($\Delta \sim 10$ км) и глубине очага $h=15$ км интенсивность сотрясений в Улан-Удэ не должна превысить 8 баллов. Это хорошо согласуется с картами ОСР-2015-А и ОСР-2015-В. В случае же возникновения максимального расчетного землетрясения ($M=6.5$) (при одинаковых прочих условиях) интенсивность сотрясений I в г. Улан-Удэ составит 9 баллов (карта ОСР-2015-С). Необходимо отметить, что по совокупности всех исторических и инструментальных данных наиболее сильным землетрясением на территории Западного Забайкалья считается событие 19 ноября 1885 г. с $M=6.2$ [2], что лишь немного не достигает $M_{\max}=6.5$.

Графики характеризующие сейсмический режим территорий (рис. 2а, б), построены для территории в пределах координат: $\varphi=49.7^\circ-54.0^\circ$, $\lambda=103.5^\circ-111.0^\circ$ за 65-летний период наблюдений. Отмечается асинхронность выделения сейсмической энергии (рис. 2а), практически отсутствие слабой сейсмичности в Забайкалье что, безусловно, сказывается на низком качестве расчета этого коэффициента графика повторяемости.

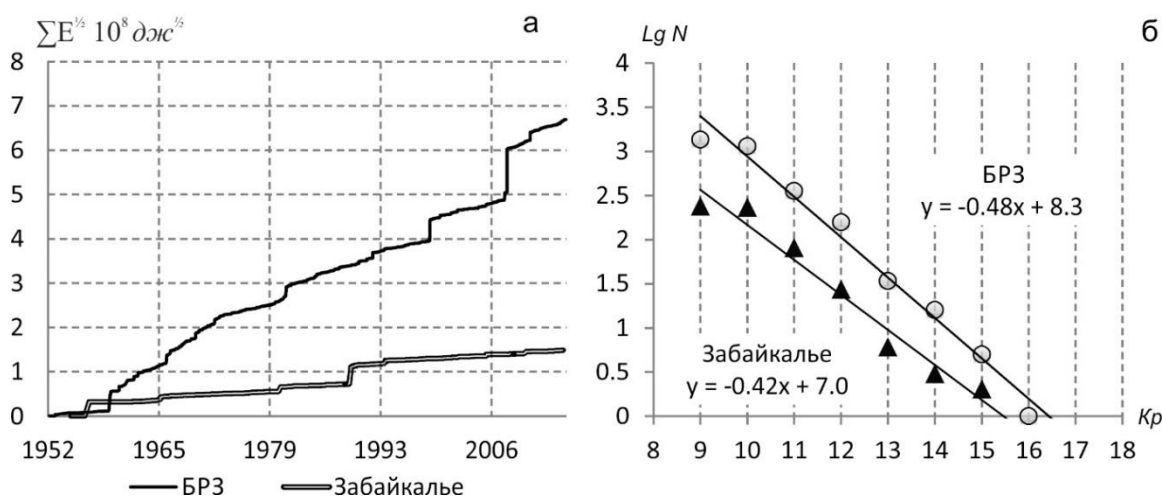


Рисунок 2 – Графики снятия условных упругих деформаций (по Беньофу) – а, графики повторяемости – б; для территорий БРЗ и Забайкалья.

Очевидно, что для более адекватной оценки сейсмического потенциала сейсмически слабоактивной территории Забайкалья необходимо исследование неотектоники крупных тектонических структур, слагающих южное обрамление Байкальской рифтовой системы в приграничных районах России и Монголии.

На рис. 3 представлены результаты исследований, проведенные совместно с Мельниковой В.И. (ИЗК СО РАН, г. Иркутск), где на схеме, в плоскости земной коры в виде стрелок представлены среднестатистические характеристики поля сеймотектонических деформаций (СТД), установленные по совокупным данным о механизмах очагов землетрясений разных магнитуд. Реконструкция СТД по методике С.Л. Юнги [5, 6] проводилась в сеймогенерирующем слое толщиной 20 км, при этом осреднение исходных данных осуществлялось в элементарных подобластях с радиусом около 1 градуса. Полученные значения относились к центрам («узловым точкам») выбранных участков. Там, где данных для статистической оценки напряжений и деформаций в земной коре недостаточно, например, вблизи г. Улан-Удэ, показаны фокальные механизмы отдельных землетрясений. Из рис. 3 видно, что в Забайкалье по сравнению с Байкалом, меняется режим сеймотектонического деформирования земной коры: с доминирующего СЗ растяжения на субширотное горизонтальное сжатие. Особенно показателен в этом смысле сдвиговый механизм (с небольшой компонентой сжатия) наиболее сильного толчка (2 октября 1980 г., $M_s=5.1$), произошедшего вблизи Улан-Удэ. Несколько сейсмических событий средних магнитуд ($M \leq 4$) с рифтовыми механизмами, наблюдавшихся в окрестностях города, показывают низкий уровень и локальность рифтовых напряжений.

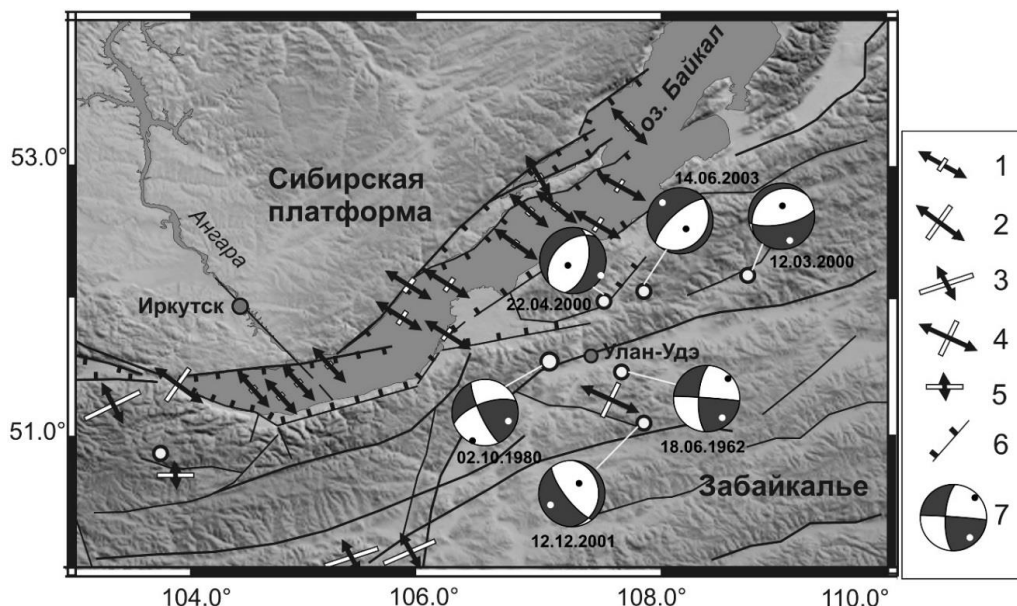


Рисунок 3 – Схема режимов сеймотектонических деформаций (горизонтальная проекция) в земной коре БРЗ и Забайкалья по совокупным данным о механизмах очагов землетрясений (1950–2012 гг.) и механизмы отдельных сейсмических событий.

Режимы СТД: 1 – удлинения, 2 – сдвига, 3, 4 – переход от сдвига к сжатию и растяжению 5 – косой сдвиг; 6 – кайнозойские разломы; 7 – стереограмма фокального механизма в проекции нижней полусферы, выходы осей главных напряжений сжатия и растяжения обозначены черными и белыми точками.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что на территории Западного Забайкалья, контактирующей с Байкальским сейсмическим поясом, могут быть опасны не только транзитные сотрясения, но и местные сильные землетрясения, очаги которых формируются в отличном от БРЗ сейсмотектоническом деформационном режиме. Следует учесть, что в сейсмологическом отношении рассматриваемая область изучена еще далеко недостаточно. Недавние исследования позволили обнаружить новые данные о землетрясениях с эпицентрами в Западном Забайкалье, произошедших во второй половине XIX века (9 октября 1864 г. ($M=5.1$) [7] и 13 ноября 1898 г. ($M=5.9$) [8]). Результаты этих работ, в совокупности с известными историческими и инструментальными данными, подтверждают возможность возникновения сильных землетрясений в пределах периферии Байкальского сейсмического пояса.

1.2. Пространственно-временная характеристика сейсмичности центральной части Байкальского рифта

Оценка сейсмичности была проведена для района $\varphi = 51,7^{\circ}–53,7^{\circ}$ с.ш. и $\lambda = 106,1^{\circ}–109,1^{\circ}$ в.д. в пределах акватории оз. Байкал. По историческим данным за последние 150 лет в районе исследования произошло четыре катастрофических землетрясения (1862, 1885, 1903, 1959 годов). При наиболее сильном – Цаганском (1862) – образовался залив Провал, и было затоплено 220 кв. км суши. Среднебайкальское землетрясение от 29.08.1959 ($M=6,8$) является одним из сильнейших за инструментальный период регистрации, с 50–х годов 20 века [2].

За 2001–2014 гг. локальной сетью сейсмостанций было зарегистрировано и обработано более 20 тысяч 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) [9] (рис. 4).

Исследуемая территория нами была условно разделена на две зоны – «среднебайкальская» и «ольхоно-святоноская». Такое разделение обусловлено как территориальным делением, так и различиями в характере эпицентрального поля. В области дельты р. Селенги очаги группируются в вытянутые вдоль оз. Байкал пространственные кластеры. Между о. Ольхон и п-вом Святой Нос отмечается рассредоточенный характер расположения эпицентров с изометричными скоплениями очагов землетрясений (южная окраина северобайкальской впадины). Границы раздела между зонами достаточно условны, но приурочены к слабоактивным участкам.

Распределение числа землетрясений по областям различных классов неравномерно. Ольхоно-святоносская область характеризуется повышенным количеством средних и сильных землетрясений (оба события с $K_p > 14$ произошли именно в этой области) по сравнению со второй областью. В среднебайкальской зоне сейсмичность характеризуется интенсивным потоком слабых землетрясений до 7 класса. С 2001 по 2013 год в этой области землетрясений 14-го и больше класса не зарегистрировано, несмотря на то, что все исторически наиболее сильные землетрясения произошли именно в этой области. (рис. 4 врезка).

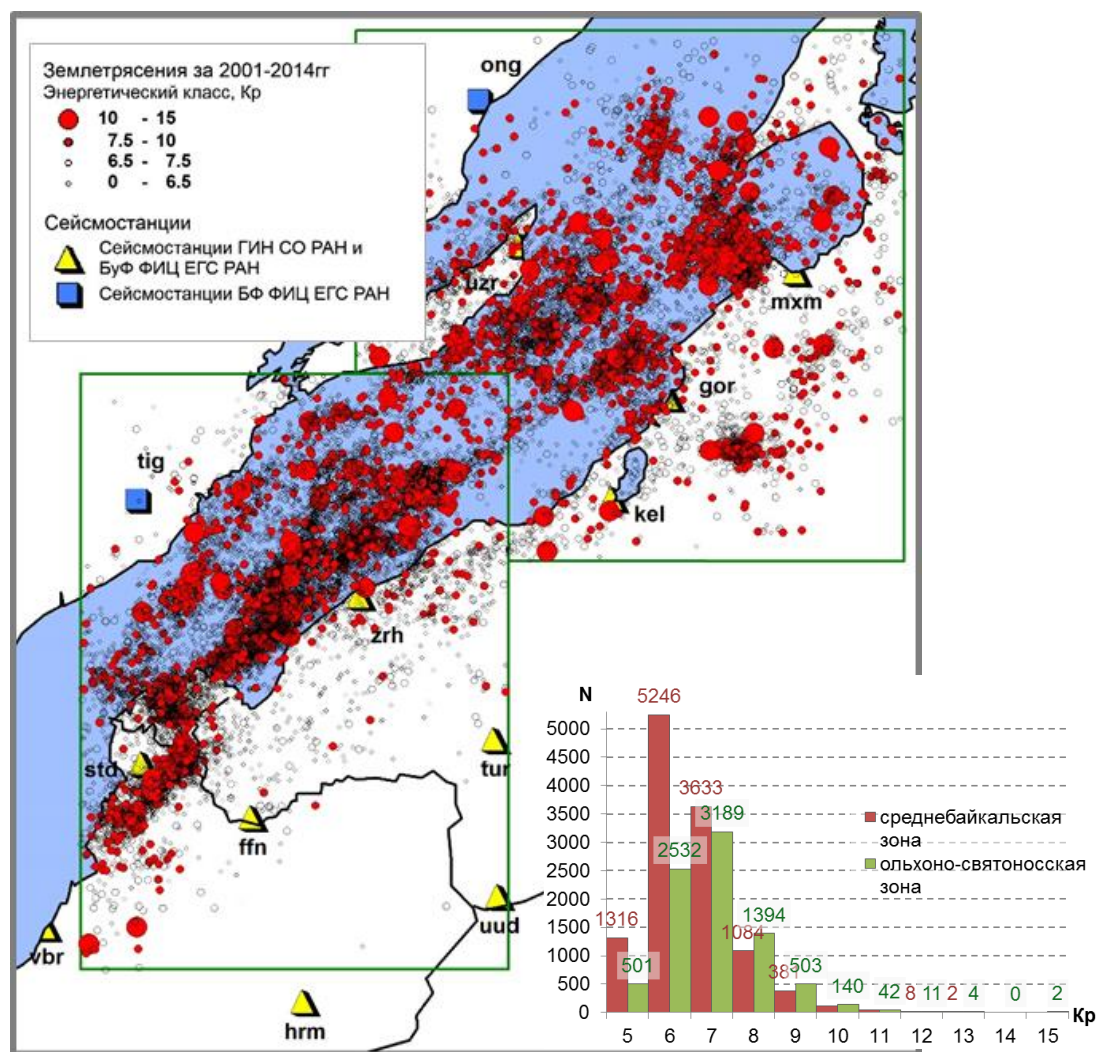


Рисунок 4 – Сейсмичность центральной части БРЗ за 2001- 2014 гг. Врезка – количество землетрясений по классам в исследуемых областях.

Наибольшее число землетрясений регистрируется в зимний период, исключения составляют весна 2008г и лето 2011г, что объясняется афтершоковыми активизациями, связанными с Максимихинским (20.05.2008г, $K=14,3$) и Туркинским землетрясениями (16.07.2011г, $K=14,5$).

Для оценки представительности каталога построено распределение повторяемости событий за период с 2001 года по 2014 год, включительно. Линейность логарифма частоты событий от логарифма энергии соблюдается в диапазоне энергетических классов 7 – 12 (для всего временного промежутка) и 7 – 9 для годовых вариаций. Таким образом, выборки событий в этих энергетических диапазонах приняты как статистически представительные для исследования закономерностей сейсмического режима.

Статистика пространственно-временного распределения сейсмичности оценивалась по плотности вероятности количества землетрясений 7-9 классов в 30-ти дневном временном окне. Для всей области исследования математическое ожидание количества событий составляет в среднем 60 событий 7 – 9 энергетических классов за 30 дней, с дисперсией 60 событий. Для среднебайкальской зоны математическое ожидание составляет 15 событий за 30 дней; дисперсия – 25 событий (предельное отклонение от наиболее вероятного количества событий). Плотность вероятности для ольхоно-святоносской зоны приближается к общезональному распределением. Математическое ожидание для ольхоно-святоносской зоны составляет 30 событий за 30 дней, а дисперсия составила 70. Также наблюдаются аномальные значения, значительно превышающие пределы дисперсии (более 200 событий за 30 дней), которые связаны с афтершоковыми последовательностями землетрясений.

Эти данные легли в основу разработки способа выделения пространственно-временных групп (кластеров) землетрясений. Было выделено 123 группы различного характера с $N \geq 5$ (рис. 5).

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, *форишоковые*, 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.

Положение сейсмических групп приурочено к областям наиболее плотного расположения эпицентров землетрясений (рис. 5). В ольхоно-святоносской зоне за 2001-2013 гг было выделено 80 групп землетрясений, не считая дуплетов. 68 групп включает до

20 событий, 7 групп – 21-50 событий, 3 группы до 100 событий и 2 группы свыше 200 событий. Группы относительно изометричны. Наиболее многочисленны группы (свыше 200 событий) – это афтершоковые активизации после Максимихинского и Туркинского землетрясения (рис. 5). В среднебайкальской зоне выделено 143 группы землетрясений, из них 130 групп включает до 20 событий, 9 групп – 21-50 событий, 2 группы до 100 событий и 2 группы свыше 100 событий. Группы расположенные ближе к северному краю зоны относительно изометричны, на остальной территории группы имеют линейный характер. Доля событий, вошедших в выделенные кластеры составляет 15 % от всего количества землетрясений и, по нашему мнению, представляет сосредоточенную сейсмичность [10]

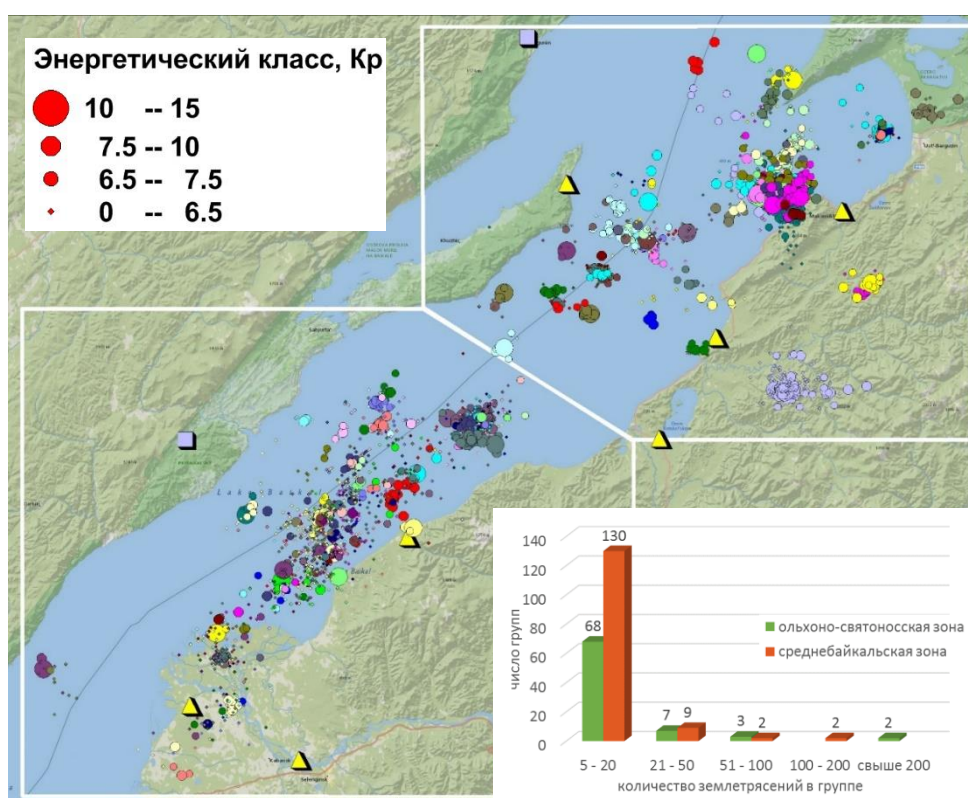


Рисунок 5 – Схема расположения групп землетрясений за 2001-2013гг. и диаграмма числа групп с разным количеством землетрясений.

Сильные землетрясения за короткие периоды (до одного года) распределяются в пространстве случайным образом, что характерно для рассеянной сейсмичности. В то же время за многолетний период, концентрируясь в протяженные очаговые области, они могут отражать сосредоточенную сейсмичность. Слабые землетрясения имеют тенденцию к группированию, образованию роев в ограниченных областях, при этом рассеиваясь по всей исследуемой площади. В целом, полученные данные свидетельствуют разномасштабном характере сосредоточенной и рассеянной сейсмичности.

1.3. Исследование глубинного строения методом функции приемника (RF)

Неоднозначная, но существующая связь поверхностных процессов с глубинными заставляет более внимательно изучать и использовать результаты региональных глубинных исследований. Восточное побережье озера Байкал является отличным полигоном для сейсмологических исследований, поскольку в настоящий момент на ее территории развернута система наблюдений из 10 стационарных сейсмических станций, обеспечивающая накопление значительной базы цифровых записей. В работе использованы цифровые трехкомпонентные записи широкополосной сейсмической станции Хурамша (HRM), входящей в локальную сейсмологическую сеть. В общей сложности обработано 88 землетрясений. Для обработки экспериментальных данных и выделения обменных волн применена методика приемных функций обменных волн Ps [11]. В качестве основных программных средств использовались – программный комплекс обработки и анализа сейсмических данных Seismic Handler под операционной системой Linux (Ubuntu), разработанной Клаусом Стаммлером из Сейсмологической обсерватории Grafenberg, и разработки сотрудников Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта к.ф.-м.н. Г.Л. Косарева, к.ф.-м.н. С.И. Орешина.

Проведено изучение глубинного строения земных недр на основе накопленных цифровых записей далеких землетрясений, с использованием данных одиночных стационарных сейсмостанций, что позволяет, в отличие от других сейсмических методов, в условиях редкой сети сейсмостанций, сопоставлять результаты наблюдений, проведенных в разное время. Показана возможность реализации метода приемных функций и получена надежная, сравнительно детальная информация о скоростной структуре земной коры и мантии, дополняющую ранее проведенные исследования [12].

Для решения обратной задачи (инверсия приемных функций обменных волн Ps в скоростной разрез) применялась стартовая модель со слоями, лежащими на полупространстве, параметрами в которой являются скорости продольных и поперечных волн, плотности, мощности слоев и отношения V_p/V_s со значениями 1,73 в коре и 1,8 в мантии [13], плотность определялась по формуле Берча [14]. Расчеты были проведены по программе, разработанной Г.Л. Косаревым [13]. Результаты в виде скоростных разрезов представлены на рисунке 6. 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 [15].

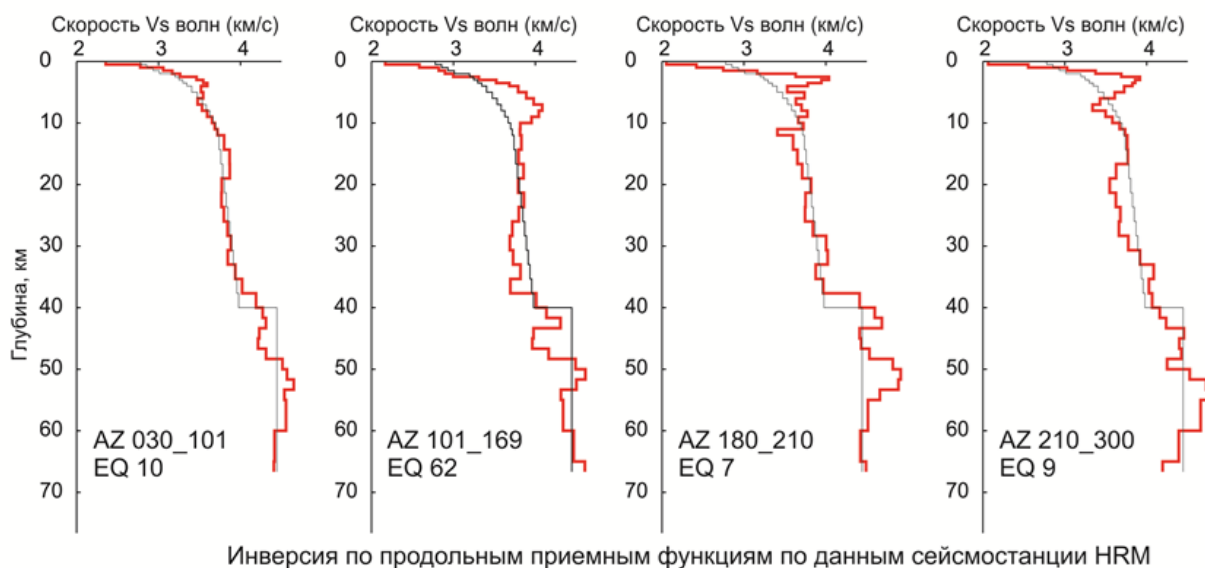


Рисунок 6 – Скоростные разрезы по данным сейсмостанции «Хурамша».

1.4. Исследование динамических характеристик сейсмических волн

Разработана методика расчета рассеяния и поглощения сейсмических продольных и поперечных волн, позволяющая по данным сети сейсмостанций выявлять латеральные неоднородности разломно-блоковой сейсмоактивной среды.

Работа проведена в рамках исследования динамических характеристик сейсмических волн (частотные параметры, затухание) землетрясений центральной части Байкальского рифта. Это тематика актуальна для решения задач оценки сейсмической опасности (балльности) и изучения природы землетрясений. Затухание сейсмических волн, помимо явления геометрического расхождения, вызвано явлениями рассеяния и поглощения. Поглощение также называют внутренним затуханием (intrinsic attenuation, Q_i^{-1}), а рассеяние (scattering, Q_{sc}^{-1}) связывают с перераспределением энергии в разных направлениях, т. е. это явление обусловлено неоднородностями среды прохождения сейсмических волн. Рассеяние является причиной появления на сейсмограммах сейсмической коды - асимптотически убывающих амплитуд колебаний, записанных после прихода прямых волн [16].

С помощью метода инверсии огибающей сейсмической коды [17] была проведена количественная оценка вклада каждой из компонент в общее затухание Q_T^{-1} :

$$Q_T^{-1} = Q_i^{-1} + Q_{sc}^{-1}$$

Разделение общего затухания на компоненты можно осуществить, зная механизм воздействия каждой компоненты на форму огибающей колебаний в зарегистрированной сейсмограмме (рис. 7). 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.

Согласно [18] плотность потока энергии колебаний в огибающей в узкой полосе частот можно получить с помощью формулы:

$$E_{mod}(t, r) = W \cdot R(r) \cdot G(t, r, g) \cdot e^{-bt},$$

где W — энергия в очаге (spectral source energy), $R(r)$ — коэффициент усиления для площадки (site amplification factor), e^{-bt} — описывает экспоненциальное затухание со временем, зависящее от параметра внутреннего поглощения b , $G(t, r, g)$ — функция Грина, рассчитанная для прямых волн и рассеянного волнового поля (единица измерения м^{-3}), g — вектор, определяющий параметры рассеяния.

Теоретическая огибающая E_{mod} сравнивается с наблюдаемой сейсмограммой. Расчет заключается в подборе таких значений параметров W , g и b , значение которых минимизирует невязку между теоретической и экспериментальной огибающими. Пример расчета показан на рис. 7.

Значения внутреннего затухания Q_i^{-1} и рассеяния на неоднородностях среды Q_{sc}^{-1} вычисляются из уравнений:

$$Q_{sc}^{-1} = \frac{g_0 v_0}{2\pi f}, \quad Q_i^{-1} = \frac{b}{2\pi f}$$

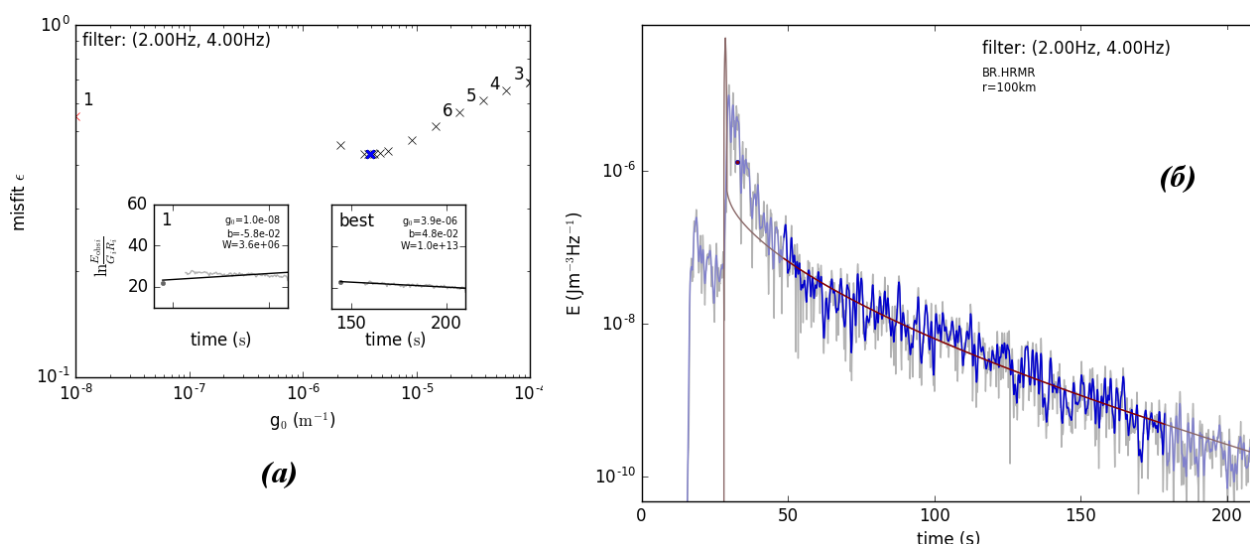


Рисунок 7 – Пример расчета параметров огибающей для сейсмограммы, отфильтрованной на частоте 3 Гц (полоса 2–4 Гц). На врезках показано начальное и лучшее решение оптимизации (а) и наложение теоретической и экспериментальной огибающих (б) для землетрясения на эпицентральном расстоянии 100 км от ст. Хурамша (HRMR).

Для расчета методом инверсии огибающей коды были выбраны записи землетрясений с энергетическим классом $K=11-14.3$, записанных на эпицентральных расстояниях не более 200 км на сейсмических станциях Хурамша (HRMR) и Степной Дворец (STDB). Затухание оценивалось в диапазоне от нескольких секунд (0,25–0,5 Гц) до 32 Гц (16 Гц для станции STDB, записи которой имеют частоту дискретизации 50 Гц).

Полученные результаты разделения общего затухания на компоненты для двух станций достаточно сильно отличаются друг от друга. Для станции 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 STDB, расположенной вблизи зоны влияния активного Дельтового разлома в районе дельты р. Селенги, характеризующейся также мощным осадочным покровом, толщина которого достигает нескольких километров [19], 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).

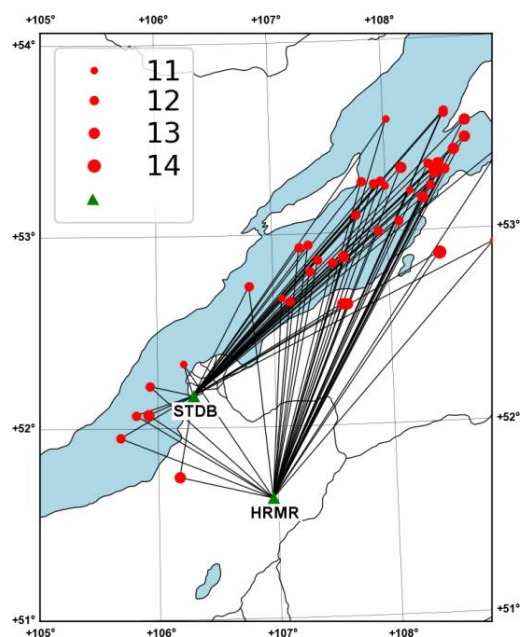


Рисунок 8 – Схема расположения станций (зеленые треугольники), эпицентров землетрясений (красные кружки, размер кружка соответствует энергии землетрясения) и трасс «источник-приемник».

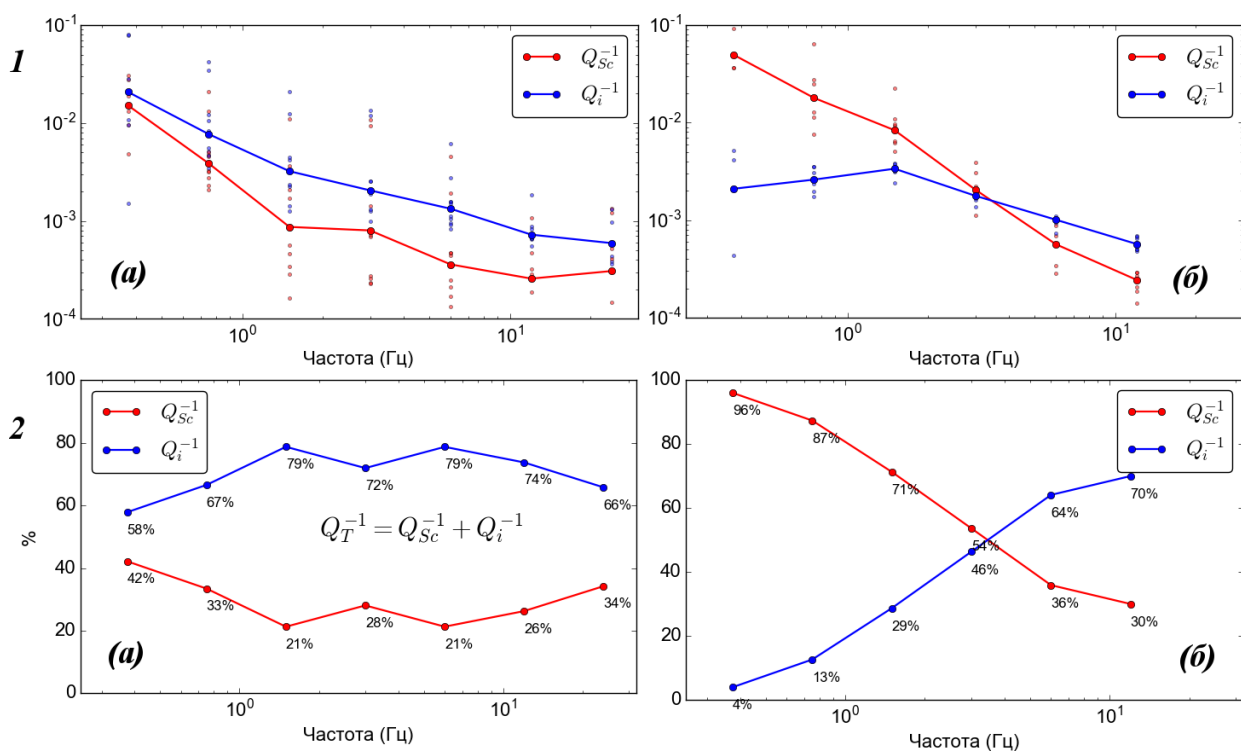


Рисунок 9 – Соотношение поглощения и рассеяния сейсмических волн. Абсолютные значения (1) и значения в процентах от общего затухания (2) для станции Хурамия (а) и Степной Дворец (б).

Пространственное двумерное картирование затухания сейсмических волн выполнено методом перекрывающихся эллипсов (рис. 10). В основе метода [20] лежит предположение, что значение затухание, полученное для пары «источник-приемник»,

характеризует не только трассу, а некоторый объем среды (эллипсоид), в фокусах которого расположены сейсмическая станция и землетрясение.

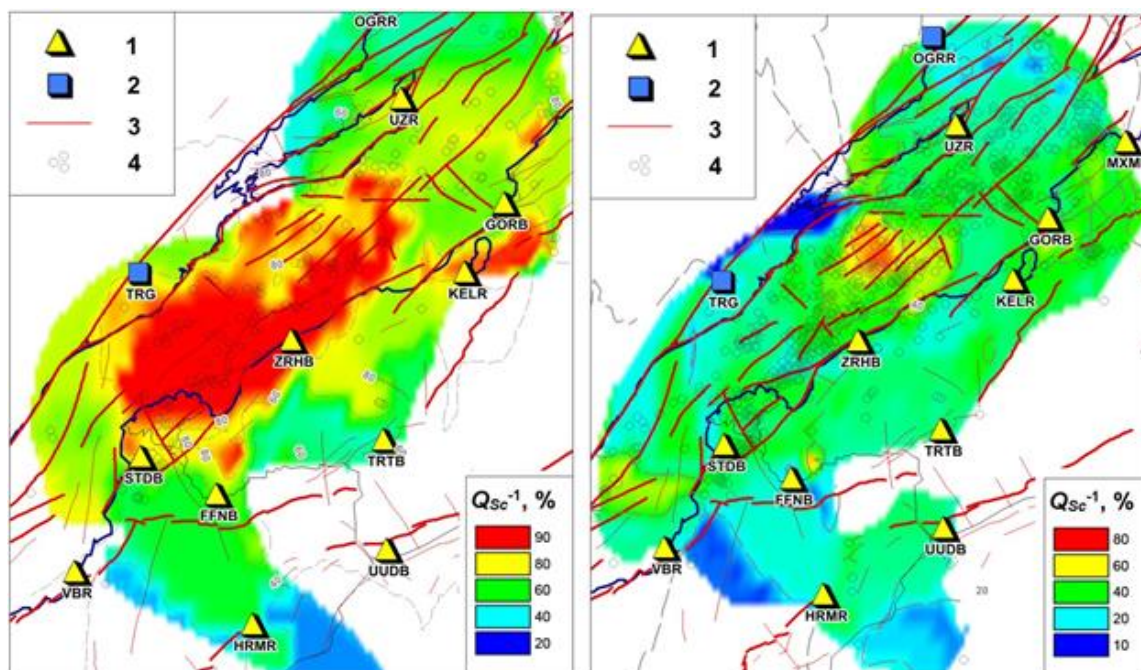


Рисунок 10 – Карта пространственного распределения рассеяния на неоднородностях среды (Q_{sc}^{-1}) в процентах от значения общего затухания (слева – для частоты 1,5 Гц, справа – для частоты 12 Гц). Показано расположение сейсмических станций, 1 – Бурятского филиала и ГИН СО РАН, 2 – Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН, 3 – сейсмоактивных разломов согласно [21], и эпицентры землетрясений, использованных в обработке.

В результате получены детальные оценки затухания прямых объемных S-волн и коды в земной коре и верхней мантии Байкальской рифтовой зоны и сопредельной территории Забайкалья. 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 (6-12 Гц) 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 Хурамша).

Продолжаются работы с уникальной научной установкой, вибрационным источником сейсмических волн ЦВ-100.

Проведена экспериментальная верификация скоростных глубинных моделей с использованием уникальной установки - вибросейсмического источника сейсмических волн ЦВ-100 (Байкал) показала соответствие времен вступлений Р-волн на вибрационных и теоретических сейсмограммах для наиболее интенсивных волн. Это свидетельствует об эффективности применения методов математического моделирования и активной сейсмологии для исследования и верификации скоростных моделей земной коры и верхней мантии. Результаты исследований опубликованы в статье Kovalevsky V.V., Fatyanov A.G., Karavaev D.A., Braginskaya L.P., Grigoryuk A.P., Mordvinova V.V., Tubanov Ts.A., Bazarov A.D., 2019. Research and verification of the Earth's crust velocity models by mathematical simulation and active seismology methods // *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (3), 569–583.

2. Разработка критериев оценки сейсмобезопасности и надежности зданий и сооружений

Продолжено исследование методов идентификации прочностных характеристик строительных конструкций на основе экспериментальных инженерно-сейсмометрических значений модальных параметров и скорости деформационной волны. Выявлено, что значение модальных частот собственных колебаний инженерных сооружений имеет квадратичную зависимость от жесткости второстепенных неконструктивных элементов. При этом волновой параметр, характеризующий скорость распространения поперечной сейсмической волны по высоте имеет линейную зависимость от жесткости стен здания.

Актуальность разрабатываемой методики определяется необходимостью введения инструментального контроля проектирования и строительства современных высотных зданий в сейсмоопасных регионах.

Оценка технического состояния существующих конструкций в настоящее время заслуживает особого внимания по многим причинам и среди них необходимость сейсмоусиления в соответствии с новыми сейсмическими правилами. Однако отсутствие достоверной информации об интегральном состоянии конструкции даже на первоначальном этапе резко повышает уровень неопределенности любой диагностики. Простой способ преодоления этих трудностей — это оценка общего состояния на основе исследования динамических параметров конструкции. Кроме того, исследование динамических параметров инженерных сооружений необходимо при решении следующих

задач: (1) экспериментальной калибровки упругих свойств численной модели здания; (2) мониторинга технического состояния [22] при капитальном ремонте и проведения мероприятий по сейсмоусилению; (3) оценки фактической сейсмостойкости существующих зданий; (4) дефектоскопии, локализации ослабленных мест и дефектов. Дополнительно к модальным параметрам в работе проведено определение скорости распространения поперечных сейсмических волн по высоте здания, что существенно повышает информативность вибрационного исследования, так как согласно работе [23] модальные параметры существенно зависят от второстепенных конструктивных элементов, таких как кирпичное заполнение каркаса и перегородок, а также от грунтовых условий площадки застройки.

Также проведено исследование зависимости частот колебания от жесткости несущих конструктивных элементов на примере стенового кирпичного ограждения (рис. 11а). В данном случае снижение жесткости стенового ограждения приводит к плавному снижению частот колебания первой (F_1) и второй (F_2) моды, которые можно аппроксимировать полиномиальными уравнениями в зависимости от жесткости стенового ограждения (E):

$$F_1 = -0.1657 * E^2 + 0.9286 * E + 1.8443$$

$$F_2 = -0.3901 * E^2 + 2.4429 * E + 7.1071$$

Отклонения минимальной частоты колебания от максимальной для данной численной модели здания может достигать 40% в зависимости от степени участия кирпичного ограждения в работе несущего каркаса, которое довольно трудно оценить, так как в основном зависит от конструктивных особенностей обустройства контакта между кирпичным заполнением и железобетонными несущими элементами. Учитывая квадратичную зависимость жесткости от частоты колебания можно оценить погрешность в 60% при определении истинной прочности несущих конструктивных элементов, в случае применения только частот собственных колебаний для калибровки модели здания.

Для поиска стабильно динамического параметра проведено исследование зависимости скорости (V_s) распространения сейсмического импульса по высоте здания в зависимости от жесткости (G_k) стенового ограждения (рис. 11б) описываемое уравнением:

$$V_s = \frac{2h_k}{k} \sqrt{\frac{(G_k + G)}{M_k}}, \text{ где } h_k \text{ высота } k\text{-ого этажа}$$

Полученная зависимость аппроксимируется линейным уравнением вида.

$$V_s = 26.667 * G_k + 250$$

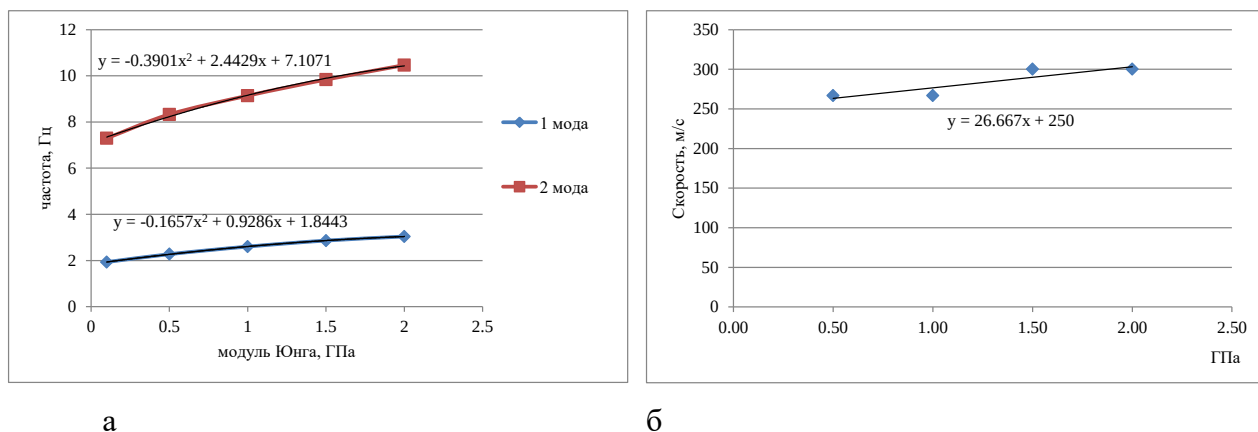


Рисунок 11 – Зависимость частот 1 и 2 моды колебаний (а) и скорости поперечных волн (б) от жесткости стенового ограждения.

3. Моделирование пространственно-временной эволюции глубинного флюида и вмещающей среды в литосфере БРЗ

Разработана параметрическая модель температурной эволюции мантийно-корового мигранта (плюма) и вмещающей среды, учитывающая хрупко-пластическую реологию. Установлено, что плюмовый флюид, особенно карбонатный, определяет характер магматизма кратонной литосферы. Предложен метод математико-физических аппроксимаций для расчёта распределения температурных полей между трендом мантийно-корового мигранта и вмещающей средой. Методика реализована в запатентованных программах для двумерного моделирования теплового возмущения термоградиентной среды при внедрении магматического мигранта и для стохастического моделирования поведения систем случайных поднимающихся флюидозаполненных трещин (полостей) в пластичной среде.

3.1 Модель эволюции вещества вмещающих пород при подъёме мантийно-корового мигранта

Актуальный вопрос физической аргументации процесса транспорта глубинного вещества в литосферу, модельно рассмотренный нами в работах [24], далее требует изучения в направлении теплофизической эволюции как самого мигранта (системы мигрантов, плюма), так и вмещающей его среды. Многообразие предлагаемых в тематической литературе моделей плюмов по сути сводится к различному распределению полей теплофизических свойств среды между центральной частью плюма и термически невозмущённой окружающей средой, сохраняющей температурный профиль региональной геотермы. Следовательно, это — задача теплопереноса, и решение её для кондуктивного случая равносильно решению уравнения [25]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right),$$

где T – температура, t – время, ρ – плотность, c_p – изобарная теплоёмкость, λ – коэффициент теплопроводности среды, x, y, z – пространственные координаты (длина, ширина и глубина соответственно)

Общепринято решать такие уравнения, используя различные разностные схемы, требующие многоитерационных вложенных циклов. Принимая во внимание, что при движении плюма (изменении начальных и граничных условий) решение этого уравнения приходится производить множество раз, а при учёте неравномерного конвективного теплопереноса количество решений возрастает на порядки, констатируем, что такой подход крайне неэкономичен при использовании доступных вычислительных мощностей и программного обеспечения. Эта ограниченность определяет необходимость упрощения, т.е. поиска дополнительных аппроксимаций, которые, тем не менее, дают корректные результаты.

Нами разработан метод логических и математико-физических аппроксимаций для расчёта распределения температурных полей между трендом поднимающегося мантийно-корового мигранта и окружающей средой. Четырёхмерная задача (x, y, z , время) сведена к двумерной (x , время) для наиболее часто рассматриваемого случая — симметрии плюма вокруг центральной оси. Решена проблема передачи теплового потока от нижележащих пространственных слоёв к вышележащим, который зависит от шага по глубине, перепада температуры и теплопроводности среды:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dz},$$

Таким образом, для пространственной преемственности временных слоёв по общей глубине H при каждом из $H/\Delta z$ решений нужно задавать начальное приближение

$$T_i^0 = \xi(x_i), i = 1, \dots, N - 1$$

как некоторую функцию от предыдущего решения уравнения (N – количество шагов по латерали). Эта функция исследуется авторами и может быть описана как аналогия внутреннего трения (кинематической вязкости среды):

$$\frac{d\xi}{dz} = \psi \left(\frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\lambda \rho}{c_p} \right),$$

где ψ – функция, аналогичная вязкости, ε – коэффициент, пропорциональный показателю адиабаты

Действительно, в физике давно принята аналогия теплопроводности и

самодиффузии (внутреннего течения) в газах и жидкостях, также известная как аналогия Рейнольдса. Как показывает наше исследование, она может использоваться и при расчётах теплопереноса в твёрдых средах, но требует дальнейшего, более глубокого исследования, что, в свою очередь, позволит развивать предложенный метод для моделирования мантийной конвекции.

Математически доказана симметричность мигрантов относительно вертикальной оси в изотропной среде, как в процессе подъёма, так и при эволюции по латерали. Метод реализован в программном продукте Vladi Gead, находящимся на этапе апробации и тестирования (рис. 12).

С его помощью уже получены первые данные о распределении температур во вмещающей среде при подъёме мантийно-корового флюида (рис. 13). Применение метода даже при многократном использовании (например, при проходе флюида через слои с различными физическими свойствами или при различном распределении свойств среды в разных направлениях по латерали) даёт выигрыш во времени расчёта на 1–2 порядка по сравнению с решением обычной задачи теплопереноса. При этом, получаемые результаты, ненамного приближённее. Также с помощью программы Vladi Gead успешно исследована возможность применения аналогии Рейнольдса для моделирования конвекции в мантийной среде, представленной в виде очень вязкой ньютоновской жидкости.

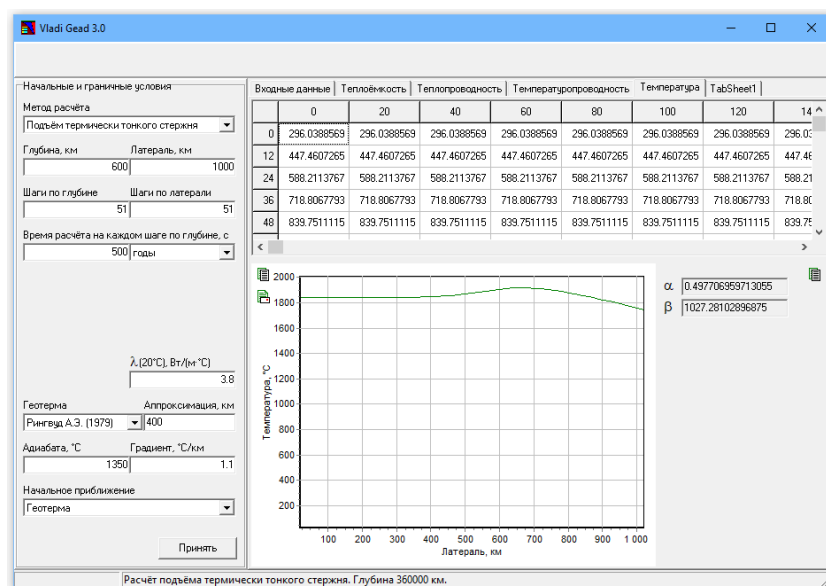


Рисунок 12 – Окно программы Vladi Gead. Показан тестовый расчёт подъёма термически тонкого стержня.

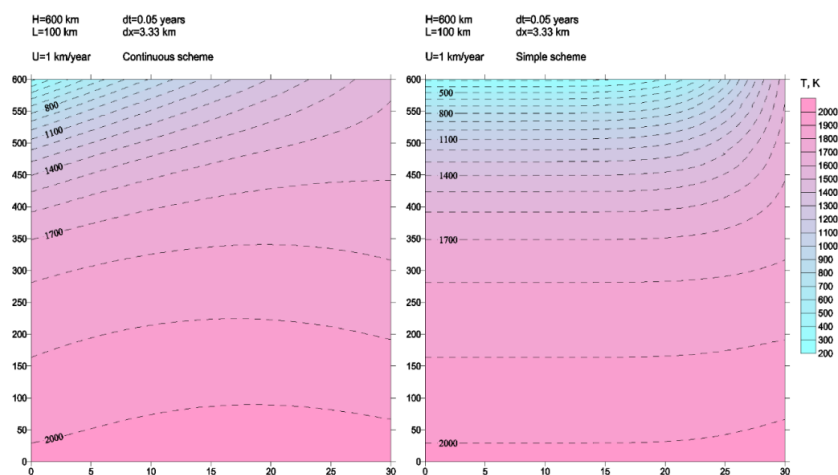


Рисунок 13 – Расчётные диаграммы температурного разреза верхней мантии. Слева: с учётом пространственной передачи импульса по аналогии Рейнольдса. Справа: без такого учёта. По горизонтальной оси отложена латераль: 0 – геотерма, 30 – плюмовая адиабата.

3.2 Модель плавления вмещающей среды под воздействием плюма

На примере авторской двумерной модели магмообразования в температурном поле плюма (реперные точки по [26]), по P-T-параметрам солидусов «сухого» перидотита, гидратированного перидотита при содержании H_2O 300 ppm, 1000 ppm и карбонатизированного перидотита (солидусы по [27]), показано, что при подъёме плюма в его температурном поле на глубине около 100 км может образоваться очаг близсолидусного частичного плавления «сухого» перидотита (dry peridotite melt) с латеральными размерами ~70 км, при добавлении воды до 300–1000 ppm при неизменном температурном поле этот очаг расширяется как в глубину, так и по латерали до значительных размеров (рис. 14).

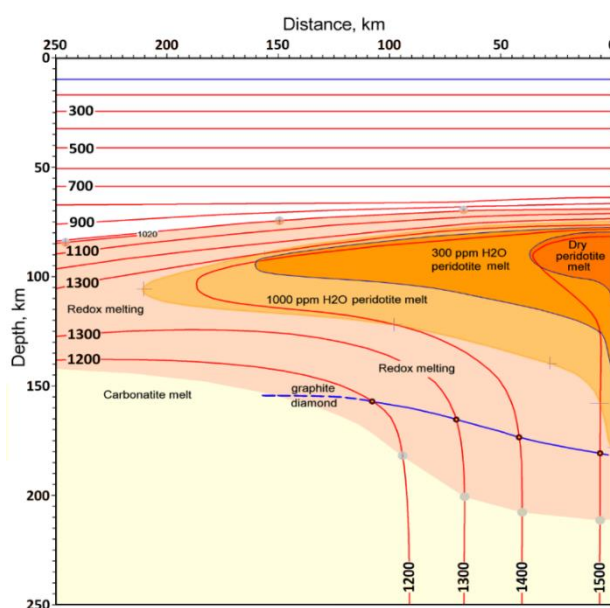


Рисунок 14 – Пример интерпретации результатов расчёта двумерной модели магмообразования в температурном поле плюма по P-T-параметрам солидусов «сухого» перидотита, гидратированного перидотита при содержании H_2O 300 ppm, 1000 ppm и карбонатизированного перидотита.

Физико-химические расчёты показали, что при наличии карбонатного флюида по мантийному перидотиту развивается карбонатитовая магма, размеры очага которой выходят за пределы

рассматриваемой области (redox-плавление). Проекция фазовой диаграммы графит-алмаз на модельную плоскость показывает, что при данных Р-Т-параметрах алмаз неустойчив в области магмообразования и не может быть вынесен на поверхность при извержении (внедрении) магмы.

3.3 Моделирование образования и эволюции мантийно-корового мигранта

Разработан программный продукт Vladi OverPressure для параметрического моделирования образования и эволюции мантийно-корового мигранта (рис. 15). В основу положена концепция накопления под мантийным горизонтальным прочностным барьером глубинного вещества с пониженной относительно вмещающей среды плотностью и его прорыва посредством гидроразрыва в пластичной среде в виде мантийно-корового мигранта [28-30]. Прорыв происходит, когда избыточное давление вещества мигранта превышает прочность вмещающей среды.

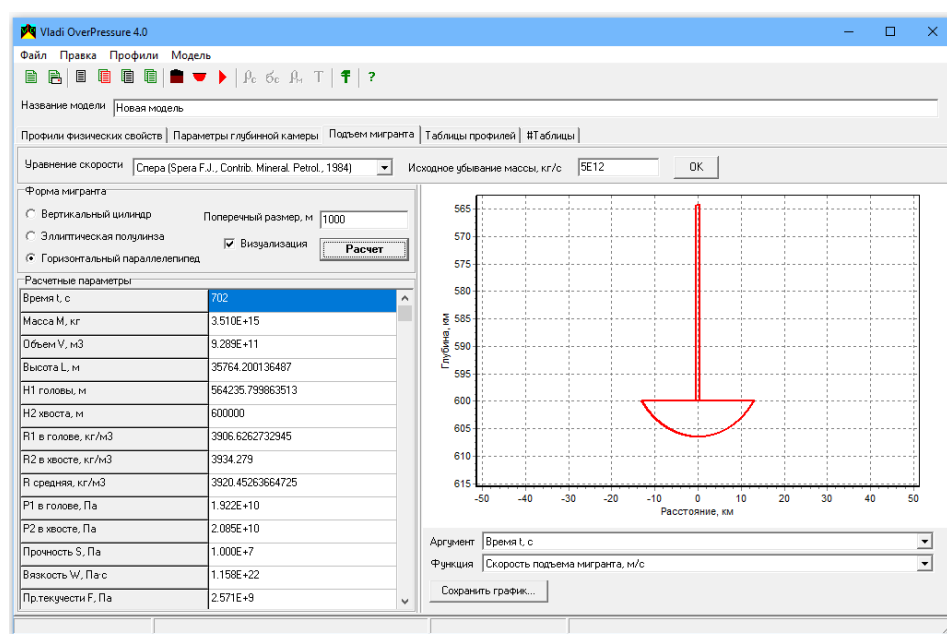


Рисунок 15 – Окно программы Vladi OverPressure 4.0 в процессе расчёта образования мантийно-корового мигранта из глубинного магматического очага.

Программа позволяет варьировать как параметром плотности вещества мигранта, так и следующими параметрами среды, задавая профили их значений от поверхности до глубины прочностного барьера: плотность, прочность (в единицах давления), температура, динамическая вязкость и предел текучести. На выходе получают численные и визуальные (2D) результаты: эволюция во времени объёма и размеров камеры, время прорыва мигранта, эволюция во времени скорости подъёма мигранта.

Предусмотрены три варианта формы глубинной камеры: выпуклая полулинза, полуэллипсоид вращения, квадратная призма; три варианта формы образующегося

мигранта: вертикальный цилиндр заданного радиуса основания, эллиптическая призма заданной толщины с малой осью эллипса, равной размеру камеры в плане, или вертикальная прямоугольная призма заданной толщины. Также предусмотрены три варианта поведения мигранта в зависимости от объёма накопленного вещества: мигрант формирует сплошной канал от прочностного барьера до поверхности, мигрант движется до поверхности, мигрант движется до очередного прочностного барьера.

Расчёт скорости мигранта производится в каждой точке подъёма (используя значения вышеприведённых параметров в этих точках) по пяти уравнениям (по выбору пользователя): Ньютона, фон Риттингера, Стокса, Аллена-Лященко и Спера.

3.4 Моделирование взаимодействия системы мантийно-коровых мигрантов (плюма)

Разработан программный продукт Vladi Joint для стохастического моделирования поведения систем случайных поднимающихся флюидозаполненных полостей (мигрантов) в пластичной среде (рис. 16).

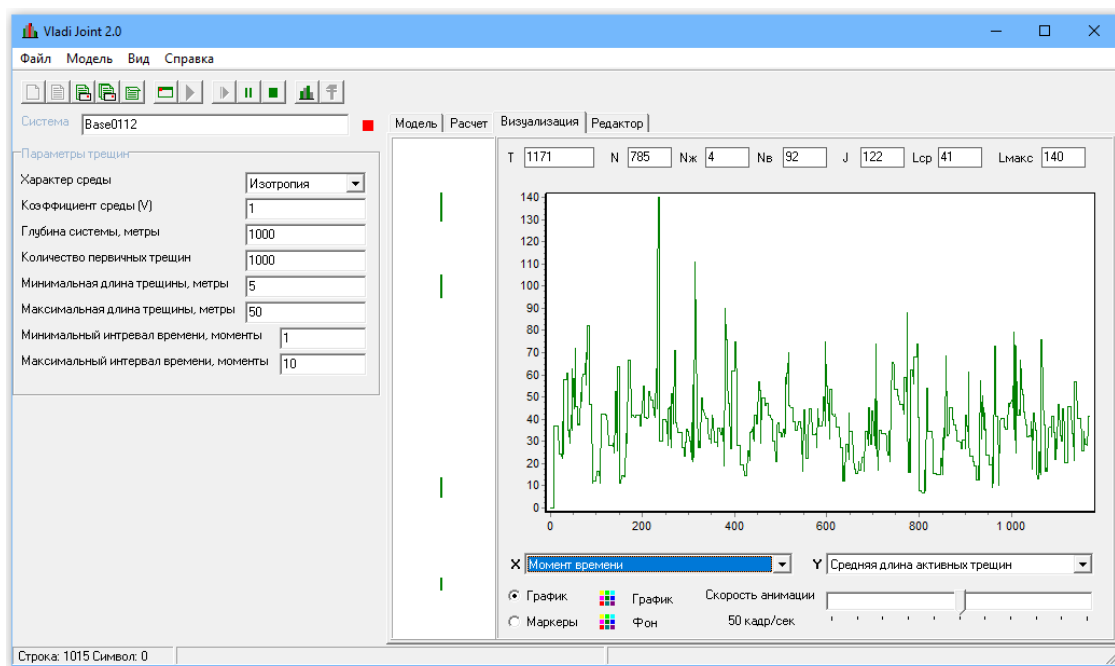


Рисунок 16 – Окно программы Vladi Joint 2.0 в процессе расчёта статистической модели подъёма и взаимодействия мантийно-коровых мигрантов (флюидозаполненных полостей).

Vladi Joint позволяет получать статистические данные о взаимодействии мантийно-коровых мигрантов псевдослучайного размера, следующих друг за другом с псевдослучайным интервалом. Программа предназначена для статистического определения взаимозависимостей между следующими величинами: момент времени;

число появившихся мигрантов; число активных мигрантов; число мигрантов, вышедших на поверхность; число слияний; средняя длина всех мигрантов; средняя длина активных мигрантов; средняя длина мигрантов, вышедших на поверхность; средняя скорость всех мигрантов; средняя скорость активных мигрантов; средняя скорость мигрантов, вышедших на поверхность; максимальная длина всех мигрантов; максимальная длина активных мигрантов; максимальная скорость всех мигрантов; максимальная скорость активных мигрантов. Программа выдаёт численные и графические результаты.

3.5 Модель эволюции вещества вмещающих пород при подъёме мантийно-корового мигранта (стандартная методика через дифференциальные уравнения нестационарной теплопроводности с частными производными)

Разработан программный продукт Vladi DisTerm для двумерного моделирования теплового возмущения термоградиентной среды при внедрении магматического мигранта (рис. 17). Vladi DisTerm позволяет моделировать распространение теплового возмущения в двумерной геологической среде в процессе внедрения магматического мигранта (мантийного плюма, диапира, интрузии) согласно методике комплексного компьютерного моделирования геологических объектов [31]. Входными данными являются: размеры моделируемой системы (количество моделируемых подсистем по вертикали и горизонтали), размер одной подсистемы, температура верхней границы, исходный градиент, температура нижней границы (может быть задана независимо от температурного градиента), размеры мигранта, температуропроводность подсистем.

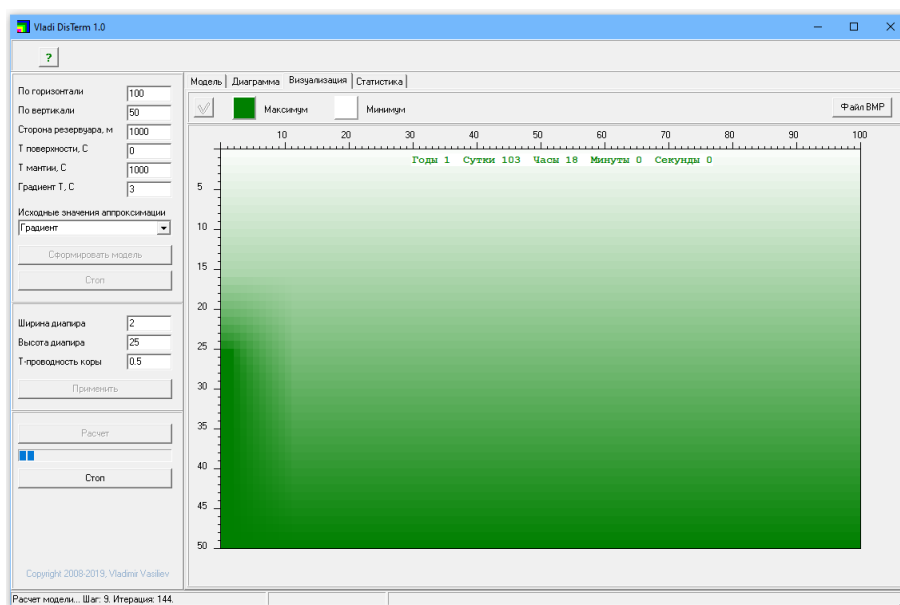


Рисунок 17 – Окно программы Vladi DisTerm 1.0 в процессе расчёта теплового возмущения термоградиентной среды при внедрении магматического мигранта.

Тепловое возмущение моделируется дискретным увеличением площади нагрева с шагом в одну подсистему с расчётом сначала времени, необходимого на следующий шаг, а затем – распределения температуры на изменившейся площади. Основным методом расчётов – численное решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с частными производными. Предусмотрена возможность ручного и автоматического сохранения графических и численных результатов на каждом шаге.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчете по НИР в 2019 году представлены промежуточные результаты по проекту проведенных в течение длительного времени детальных исследований сейсмического режима и глубинного строения при помощи расстановки автоматизированных цифровых сейсмостанций в центральной части Байкальского рифта. В частности, показано, что на территории Западного Забайкалья, контактирующей с Байкальским сейсмическим поясом, сейсмическую опасность представляют не только транзитные сотрясения, но и местные сильные землетрясения, очаги которых формируются в отличном от БРЗ сеймотектоническом деформационном режиме. Выявлены особенности сейсмического режима центральной части Байкальского рифта. Разработана методика расчета рассеяния и поглощения сейсмических продольных и поперечных волн, позволяющая по данным сети сейсмостанций выявлять латеральные неоднородности разломно-блоковой сейсмоактивной среды. Получены детальные оценки затухания прямых объемных S-волн и коды в земной коре и верхней мантии Байкальской рифтовой зоны и сопредельной территории Забайкалья, важные для оценки сейсмической опасности селитебных территорий.

Продолжено исследование методов идентификации прочностных характеристик строительных конструкций на основе экспериментальных инженерно-сейсмометрических значений модальных параметров и скорости деформационной волны. Выявлено, что значение модальных частот собственных колебаний инженерных сооружений имеет квадратичную зависимость от жесткости второстепенных неконструктивных элементов. При этом волновой параметр, характеризующий скорость распространения поперечной сейсмической волны по высоте имеет линейную зависимость от жесткости стен здания. Актуальность разрабатываемой методики определяется необходимостью введения инструментального контроля проектирования и строительства современных высотных зданий в сейсмоопасных регионах.

Разработана модель тепловой и вещественной эволюции мантийно-корового мигранта (плюма) и вмещающей среды с учётом образования магматических очагов. Теплофизические расчёты проведены по авторскому алгоритму математико-физических аппроксимаций для расчёта распределения температурных полей между адиабатой поднимающегося мантийно-корового мигранта и геотермой окружающей среды. Алгоритм реализован и запатентован в виде программ на ЭВМ. Модель эволюции системы мигрантов хорошо соотносится с проявлениями локализованной кратковременной сейсмичности («сейсмические гвозди» по [32]) в областях современной сейсмоактивности (Байкал; Курило-Камчатская, Японская островные дуги и др.).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голенецкий С.И., Демьянович М.Г., Семенов Р.М., Ясько В.Г., Авдеев В.А., Кашкин В.Ф., Мишарина Л.А., Серебренников С.П. Сейсмичность района Оронгойских впадин и землетрясение 2 октября 1980 г. в Западном Забайкалье // Геология и геофизика. – 1982. – № 9. – С. 45–54.
2. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Под ред. Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. – М.: – Наука. – 1977. – 535 с.
3. Леви К.Г., Хромовских В.С., Кочетков В.М., Николаев В.В., Семенов Р.М., Серебренников С.П., Чипизубов А.В., Демьянович М.Г., Аржанников С.Г., Дельянский Е.А., Смекалин О.П., Ружич В.В., Буддо В.Ю., Масальский О.К., Потапов В.А., Бержинский Ю.А., Радзиминович Я.Б. Современная геодинамика: сейсмотектоника, прогноз землетрясений, сейсмический риск (фундаментальные и прикладные аспекты) (Статья II) // Литосфера Центральной Азии / Под ред. Н.А. Логачева. – Новосибирск: – Наука. – Сибирская издательская фирма РАН. – 1996. – С. 150–182.
4. Уломов В.И. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации – ОСР-2012 // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2013. – Т. 40. – № 4. – С. 5–20.
5. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. – М.: – Наука. – 1990. – 191 с.
6. Юнга С.Л. О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу // ДАН. – 1997. – Т. 352. – № 2. – С. 253–255.

7. Радзиминович Я.Б. Землетрясение 9 октября 1864 года в Западном Забайкалье // Вулканонология и сейсмология. – 2014. – № 5. – С. 60–69.
8. Radziminovich Y.B. November 13, 1898 earthquake in Western Transbaikalia: a “white spot” in seismic history of East Siberia // Journal of Seismology. – 2014. – Vol. 18. – № 1. – P. 93–107.
9. Мельникова В.И., Гилева Н.А., Имаев В.С., Я.Б. Радзиминович, Ц.А. Тубанов Ц.А. Особенности сейсмических активизаций Среднего Байкала в 2008 – 2011 годах // Доклады РАН, 2013. Т. 453. № 6. – с. 1–6.
10. Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические исследования. Москва. Академкнига. 2003. 375 с.
11. Vinnik L.P. Detection of waves converted from P to SV in the mantle // Phys. Earth Planet. Inter. 1977. V. 15 (1). P. 39–45.
12. 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. 11–22.
13. Kosarev G.L., Makeyeva 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.
14. Birch F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 Kilobars, part 2 // Journal of Geophysical Research. 1961. V. 66. № 7. P. 2199–2224.
15. 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. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524841>
16. Aki K. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves // Journal of Geophysical Research. 1969. V.74. P. 615–631. <http://dx.doi.org/10.1029/JB074i002p00615>.
17. 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. T. 205. № 2. P. 744–757.
18. Sens-Schönfelder C., Wegler U. Radiative transfer theory for estimation of the seismic moment // Geophysical Journal International. 2006. T. 167. № 3. P. 1363–1372.
19. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы // Новосибирск: Наука. 1977. 304 с.

20. Mitchell B., Cong L., Ekström G., A continent-wide map of 1-Hz Lg coda Q variation across Eurasia and its relation to lithospheric evolution // *Journal of Geophysical Research*. 2008. V. 113. B04303. doi.org/10.1029/2007JB005065.
21. Лунина О.В., Гладков А.С., Гладков А.А. Систематизация активных разломов для оценки сейсмической опасности // *Тихоокеанская геология*. 2012. Т. 31. № 1. С. 49–60.
22. Иванов А.Н, Кузьменков П.Ю. Мониторинг технического состояния автодорожного моста через реку Пашенку // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2016. № 2. С. 20-27.
23. Тонких Г.П. Влияние ненесущих конструкций на динамические параметры каркасных зданий и сооружений при малоинтенсивных динамических нагрузках // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. №7. С. 29-34.
24. Жатнуев Н.С., Васильев В.И., Санжиев Г.Д. Восходящая миграция флюидов в мантии. Концептуальная, расчётная и аналоговая модели // *Отечественная геология*. 2013. № 3. С. 24–30.
25. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности // *Томск: ТПУ*. 2007. 172 с.
26. Wyllie P. J. Solidus curves, mantle plumes, and magma generation beneath Hawaii // *Journal of Geophysical Research*. 1988. N. 93. P. 4171–4181.
27. Dasgupta R., Hirschmann M.M. The deep carbon cycle and melting in Earth's interior // *Earth and Planet. Sci. Lett*. 2010. V. 298. №№ 1–2. P. 1–13.
28. Жатнуев Н.С. Трансмантийные (интрателлурические) флюиды: новая модель плюмов и плюмовогомагматизма // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57. № 8. С. 1445–1454.
29. Жатнуев Н.С. Трансмантийные флюидные потоки и происхождение плюмов // *Доклады РАН*. 2012. Т. 444. № 1. С. 50–55.
30. Жатнуев Н.С. Трещинные флюидные системы в зоне пластических деформаций // *Доклады РАН*. 2005. Т. 404. № 3. С. 380–384
31. Васильев В.И., Чудненко К.В., Жатнуев Н.С., Васильева Е.В. Комплексное компьютерное моделирование геологических объектов на примере разреза зоны субдукции // *Геоинформатика*. 2009. № 3. С. 15–30.
32. Вадковский В.Н. Субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений – сейсмические “гвозди” // *Вестник ОНЗ РАН*. 2012. 4. NZ1001. С. 1-8. doi:10.2205/2012NZ000110

ПРИЛОЖЕНИЕ *Количество научных публикаций в журналах, индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования ("Сеть науки" (Web of Science), Scopus, MathSciNet, Российский индекс научного цитирования, Google Scholar, European Reference Index for the Humanities и др.) по проекту за 2019 год:*

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

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.

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

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

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., Логинов В.А. Глубинная геоэлектрическая модель Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 2. Вып. 42. С. 9-24. **DOI:** 10.31431/1816-5524-2019-2-42-9-24

Патенты, свидетельства

1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2019621509. Российская Федерация. База сейсмологических данных Среднебайкальского района Байкальской рифтовой зоны за 2001-2013 гг. / **Санжиева Д. П.-Д., Предеин П. А., Тубанов Ц. А., Базаров А. Д.**; правообладатели: ФГБУН ГИН СО РАН, ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». – Заявка №2019621000; дата поступления:

13.06.2019; дата регистрации: 27.08.2019. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 3. – 1 с.
<https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/PrEVM/RUNWDB/000/002/019/621/509/2019621509-00001/document.pdf>

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618287. Российская Федерация. Geoseism-программа обработки сейсмических данных / Базаров А.Д.; правообладатель ФГБУН ГИН СО РАН. - Заявка №2019617048; дата поступления:18.06.2019; дата регистрации: 27.06.2019. - Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 3. – 1 с.
<https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/PrEVM/RUNWPR/000/002/019/618/287/2019618287-00001/document.pdf>

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019613716. Российская федерация. Vladi Joint – программа для статистического моделирования поведения систем случайных поднимающихся флюидонаполненных трещин (полостей) в пластичной среде / **Васильев В.И.**; правообладатель ФГБУН ГИН СО РАН (RU). –Заявка №2019612638; дата поступления:14.03.2019; дата регистрации: 21.03.2019; опубл. 21.03.2019. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 4.
<https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/PrEVM/RUNWPR/000/002/019/613/716/2019613716-00001/document.pdf>

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019613814. Российская федерация. Vladi OverPressure – программа для параметрического моделирования образования и эволюции мантийно-корового мигранта / **Васильев В.И., Васильева Е.В., Жатнуев Н.С.**; правообладатель ФГБУН ГИН СО РАН (RU). Заявка №2019612231; дата поступления: 06.03.2019; дата регистрации: 22.03.2019; опубл. 22.03.2019. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 4.
<https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/PrEVM/RUNWPR/000/002/019/613/814/2019613814-00001/document.pdf>

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019617548. Российская федерация. Vladi DisTerm – программа для двумерного моделирования теплового возмущения термоградиентной среды при внедрении магматического мигранта / **Васильев В.И.**; правообладатель ФГБУН ГИН СО РАН (RU). – Заявка №2019616467; дата поступления: 03.06.2019; зарегистр. 17.06.2019; опубл. 17.06.2019. – Официальный

бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 6. <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/PrEVM/RUNWPR/000/002/019/617/548/2019617548-00001/document.pdf>

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667677. Российская федерация «Vladi Gead - программа для теплофизических расчётов в диапазоне плюмовая адиабата - региональная геотерма» / **Васильев В.И., Жатнуев Н.С., Васильева Е.В.**; правообладатель ФГБУН ГИН СО РАН (RU). – Заявка №2019612231; дата поступления: 06.03.2019; зарегистр. 22.03.2019; опубл. 22.03.2019. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 4.

<https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/PrEVM/RUNWPR/000/002/019/667/677/2019667677-00001/document.pdf>

Руководитель проекта,

Тубанов Ц.А.

Тел: +89148407668



зав.лаб., к.г.-м.н.