Министерство науки и высшего образования Российской Федерации ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 550.34 (551.14, 550.83.042) № гос. рег. АААА-А16-116121550016-3

Инв. № 4

.042) УТВЕРЖДЕНО РЕШЕНИЕМ УЧЕНОГО СОВЕТА Эносоции обрании об

ОТЧЕТ за 2018 г. О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Проект IX.136.1.2. Исследование факторов, определяющих закономерности развития сейсмического процесса и сейсмическую опасность Прибайкалья

(промежуточный)

Номер проекта в ИСГЗ ФАНО 0340-2018-0010

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

Список исполнителей

Должность	Подпись	ФИО
к.гм.н., зав. лаб.	A.	Тубанов Ц.А.
д.гм.н., в.н.с. (0,4)	Menny	Мороз Ю.Ф.
Д.ГМ.Н., В.Н.С.	illes	Жатнуев Н.С.
К.ГМ.Н., Н.С.	Alfoly-	Цыдыпова Л.Р.
к.т.н., н.с.	AL	Базаров А.Д.
к.гм.н., н.с. (0,8)		Васильев В.И.
К.ГМ.Н., Н.С.	bacussele.	Васильева Е.В.
к.фм.н., м.н.с. (0,5)	Africa	Добрынина А.А.
м.н.с.	They-	Бартанова С.В.
М.Н.С.	Juz	Предеин П.А.
вед. инженер (0,5)	dy	Перевалов А.В.
инженер 2 кат (0,5)	· di	Цыденов А.Б.
инженер 2 кат (0,4)	the.	Толочко В.В.
инженер	×	Герман Е.И.
аспирант (инж. 0,5)	A	Санжиева Д.ПД.
инженер (0,9)	Cerne	Санжиев Г.Д.
инжлаб.	Heirag	Жигмытов Б.А.

Содержание

	Стр.	
Реферат		
Введение		
Основные научные результаты		
Исследование глубинного строения Байкальского рифта по данным МТЗ сейсмологии землетрясений и метода приемной функции в		
связи с сейсмичностью		
Совершенствование методики диагностики технического состояния		
зданий и сооружений		
Концептуальное, экспериментальное и физико-химическое		
моделирование подъема мантийного флюида		
Заключение	20	
Список использованной литературы		
Приложение		

Реферат

Отчет, 26 стр., 8 рис., 14 ист., 1 прил.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И СЕЙСМИЧЕСКУЮ ОПАСНОСТЬ ПРИБАЙКАЛЬЯ

области Объектом исследования являются сейсмоопасные 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 сейсмостанций, геомагнитные и электромагнитные пункты, проведение математического и физического моделирования.

В отчетном году предусматривалось решение следующих задач: геофизические (скорость сейсмических волн, получить данные электропроводность) земной коры мантии очаговых областей И Байкальского рифта; усовершенствовать методику диагностики технического состояния зданий и сооружений модальным способом; разработать модель миграции флюида из мантии с учетом реологии среды (хрупко-пластичного состояния) и сейсмоплотностных неоднородностей.

Создана база геофизических данных, характеризующих параметры пространственно-временного распределения геофизических полей в сейсмоактивной области внутриконтинентального рифтогенеза. Выявлено, что существующая двумерная модель электропроводности Байкальской рифтовой зоны требует уточнения. Дальнейшее улучшение модели требует проведения численного трехмерного моделирования магнитотеллурического поля и привлечения других априорных данных.

Проведено детальное исследование затухания короткопериодных поперечных S-волн и коды в земной коре и верхней мантии Южнобайкальской рифтовой впадины и его связи с активными процессами

в земной коре и мантии региона. 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, инверсия данных магнитовариационного зондирования, картирование параметров затухания 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 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 концептуальная и математическая модель образования и эволюции мантийно-корового мигранта (магмо- и/или флюидозаполненной полости), учитывающая реологию среды и сейсмоплотностные неоднородности профилей подъема. Комплексное моделирование процесса, включившее в себя как создание физической модели, так и химикотермодинамические 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 7.32-2001 в редакции 07.09.2005 г.

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 [Гольдин, 2001; Соболев, 2003]. 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 базируются сейсмоактивных областях вулканических И зонах на различных геофизических комплексном использовании 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 комплекса И междисциплинарных геофизических наблюдений.

Содержание работы в 2018 г. по проекту:

 Исследование глубинного строения Байкальского рифта по данным МТЗ, сейсмологии землетрясений и метода приемной функции в связи с сейсмичностью.

• Анализ инженерно-сейсмометрических наблюдений, сопоставление с данными численного моделирования.

 Концептуальное, экспериментальное и физико-химическое моделирование подъема мантийного флюида.

Планируемый результат выполнения работы в 2018 г. по проекту:

 Получены геофизические данные (скорость сейсмических волн, электропроводность) земной коры и мантии очаговых областей Байкальского рифта. • Усовершенствована методика диагностики технического состояния зданий и сооружений модальным способом.

• Модель миграции флюида из мантии с учетом реологии среды (хрупкопластичного состояния) и сейсмоплотностных неоднородностей.

Основные научные результаты

Исследование глубинного строения Байкальского рифта по данным МТЗ, сейсмологии землетрясений и метода приемной функции в связи с сейсмичностью.

Продолжено исследование глубинного строения Байкальского рифта по данным комплексных геофизических наблюдений, включающих локальную сеть сейсмостанций, геомагнитные и электромагнитные пункты. В результате создана база геофизических данных, характеризующих параметры пространственно-временного распределения геофизических полей в сейсмоактивной области внутриконтинентального рифтогенеза. Полученные данные актуальны для разработки методов прогноза сейсмической опасности территорий Прибайкалья и Забайкалья.

На основе накопленных данных сети широкополосных наблюдений (работа ведется совместно с ИЗК СО РАН и БФ ФИЦ ЕГС РАН) апробирована методика функции приемника обменных волн для изучения глубинного строения рифтовой зоны и сопредельных территорий. Методика позволяет 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 – МХМ, UUD, HRM, STD, KEL (рис. 1).



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 [Мороз и др., 2012].

При обработке данных, нами используется два основных алгоритма решения обратной задачи и обращения приемных функций обменных волн скоростной разрез. Первый применяется для инверсии Р-функций В приемника в скоростной разрез Vs до глубин 70 км и 280 км. Стартовая модель задана слоями, лежащими на полупространстве, параметрами которой являются скорости Р- и S-волн, плотности, мощности слоев. В первого приближения использована качестве скоростная модель регионального профиля ГСЗ и стандартная модель Земли (для больших глубин), отношение Vp/Vs задано значениями 1,7 в коре и 1,8 в мантии, плотность определяется по формуле Берча. Для инверсии используется апробированная программа (bip_sta), разработанная Г.Л. Косаревым [Kosarev et al, 1987]. 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 [Мордвинова и др., 2016].

Второй способ построения скоростного строения основан на совместном обращении обменных волн Ps и Sp, что позволяет получать распределение скоростей Vp, Vs, Vp/Vs в земной коре и в верхней мантии до глубин 300 км. Оптимальная модель определяется путем нахождения глобального минимума целевой функции, минимизация осуществляется способом "simulated annealing" [Vosegaard, Vestergaard, 1991], входящим в группу численных методов Монте-Карло. Стартовая модель выбирается области случайно В пределах предполагаемой решений, каждая вычисляется слабое последующая модель как возмущение предшествующей [Винник и др., 2017].

Продолжена работа по анализу и интерпретации данных многолетних геомагнитных и магнитотеллурических наблюдений, проводившихся в регионе (рис. 1). Результаты предшествующих исследований [Мороз и др., 2012, 2013] показали направленность векторов вещественной части магнитного типпера вкрест простирания БРЗ и различие на несколько порядков по величине электропроводности кривых МТЗ, ориентированных вдоль и поперек впадины, что указывает на наличие глубинных проводящих слоев под Байкальским рифтом, которые могут содержаться в земной коре и верхней мантии.

Электрическая составляющая наблюдений МТЗ сильно подвержена влиянию приповерхностных неоднородностей, поэтому получить более точную информацию о глубинных структурах и их границах можно с помощью магнитовариационного зондирования (MB3), поскольку искажения компонент магнитного поля уменьшаются с понижением частоты [Бердичевский и др., 2003]. Используются экспериментальные данные магнитовариационного зондирования на стационарных пунктах наблюдений ГИН СО РАН, ИСЗФ СО РАН в центральной части Байкальского рифта и проведено решение обратной задачи с применением В основе численного моделирования. профиля лежат данные магнитотеллурического зондирования (МТЗ), получена ПО которым

двумерная модель центральной части Байкальской рифтовой зоны, содержащая глубинный проводящий слой в первые десятки Ом·м на глубинах 10-20 км и коромантийный слой на глубине 30-50 км с удельным электрическим сопротивлением 10 Ом·м [Мороз, 2012].

Для магнитовариационных инверсии данных использовалась трехмерная неоднородная модель, заданная в прямоугольной сетке размером 52×140 элементов, размер каждого элемента сетки составляет 5×5 км. Численная модель включает водную толщу с удельным электрическим сопротивлением 200 Ом м и осадочный чехол с удельным электрическим сопротивлением 4 Ом. мощность которого подобрана по данным батиметрии согласно соответствующим глубинам оз. Байкал. На первом этапе расчетов подстилающий глубинный геоэлектрический разрез принят (градиентное уменьшение удельного электрического стандартным сопротивления от 1000 Ом м в верхних частях кристаллической коры до первых единиц Ом м на глубинах в первые сотни километров). Геоэлектрическая модель содержит 21 сетку, которая отражает изменение геоэлектрического разреза по латерали и вертикали.

Расчеты выполнены для различных вариантов модели в диапазоне периодов от 1 до 10 000 секунд с помощью программы [Mackie et al., 1994]. В первой пробной модели не получено удовлетворительное согласие экспериментальных и модельных кривых вещественной части магнитного типпера (рис. 2).

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 (рис. 3). 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 (рис. 3). Однако удовлетворительного совпадения пока добиться не удалось. Необходимы дальнейшие расчеты с изменением параметров глубинных проводящих зон.



Рисунок 2. Модуль вещественной части магнитного типпера (Re) согласно исходной модели осадочного чехла и экспериментальные значения в обсерватории Патроны (a) и пунктах Тырган (б), Энхалук (в), Надеино (г).

Не исключается, что в данных районах имеются дополнительные неоднородности, не включенные в модель, возможно связанные с глубинными разломами. Так, в районе обс. Патроны может влиять Саянский разлом, или разлом реки Ангара. Возможно, что с западной стороны Байкала находятся менее проводящие глубинные слои, с восточной стороны – более проводящая зона. Эти предположения будут в дальнейшем проверены с привлечением численного трехмерного моделирования магнитотеллурического поля. Таким образом, существующая двумерная Байкальской рифтовой модель электропроводности зоны требует уточнения. Дальнейшее улучшение модели требует привлечения других априорных данных и проведения численного трехмерного моделирования магнитотеллурического поля.



Рисунок 3. Модуль вещественной части магнитного типпера (Re) согласно модели с мантийным и астеносферным проводником и экспериментальные значения в обсерватории Патроны (a) и пунктах Тырган (б), Энхалук (в), Надеино (г).

Проведено детальное исследование затухания короткопериодных поперечных S-волн и коды земной коре и верхней В мантии Южнобайкальской рифтовой впадины и его связи с активными процессами в земной коре и мантии региона. По записям локальных и региональных землетрясений с использованием теории однократного рассеяния [Aki, Chouet, 1975], гибридной модели [Zeng, 1991] и подхода [Wennerberg, 1993] рассчитаны значения сейсмической добротности (Q_S и Q_C), частотного параметра (*n*), коэффициента затухания (δ), общего затухания (Q_T), а также проведена оценка вклада двух компонент затухания – внутреннего затухания (Q_i) и затухания вследствие рассеяния на неоднородностях среды (*O*_{SC}) в общее затухание. Значения сейсмической добротности показывают высокую зависимость от частоты в диапазоне 0.2–16 Гц и длины окна обработки коды (для $Q_{\rm C}$): $Q_{\rm C}$ возрастает от 57±28 до 571±108 для центральных частот 0.75 и 12.0 Гц при длине окна обработки коды W=10 с и от 141±46 до 1579±294 на тех же частотах при W=40 с; $Q_{\rm S}$ возрастает от 13 до 42 ($f_{\rm C}$ =0.75 Гц) и от 280 до 958 ($f_{\rm C}$ =12 Гц).

Построены карты сейсмической добротности и коэффициента затухания для разных частотных диапазонов, которые показывают проявление дробной структуры поля затухания на более высоких частотах. Сравнение длин волн на разных частотах и размеров структурных неоднородностей в Байкальском рифте свидетельствует о том, что мелкие блоки, входящие в состав крупных разломов, могут оказывать влияние на затухание сейсмических волн на высоких частотах (6–12 Гц), в то время как на низких частотах основное влияние будет оказывать общая делимость верхней части земной коры (3–7 км).

Пространственное положение областей повышенного и пониженного затухания в Южнобайкальской впадине определяется различиями в свойствах земной коры и верхней мантии: локализация области пониженного затухания сейсмических волн хорошо согласуется с областью повышенной плотности верхней коры, в то время как область высокого затухания расположена в южной части впадины, где по данным сейсмотомографии выявлен выступ аномальной мантии 4). (рис. Сравнительный анализ поля затухания сейсмических волн с геологогеофизическими характеристиками среды показывает существование прямой связи между затуханием и активными процессами в земной коре и мантии региона. В целом, оценка вклада внутреннего затухания (Q_i) и затухания вследствие рассеяния сейсмических волн на неоднородностях среды (Q_{SC}) в общее затухание для рассматриваемого региона выявил доминирующую роль внутреннего затухания. В то же время для областей крупных активных разломов наблюдается увеличение вклада рассеянной компоненты затухания $Q_{\rm SC}$.



Рисунок 4. Латеральные вариации параметров затухания объемных поперечных волн:(a) – сейсмическая добротность на частоте 1 Гц, (б) – коэффициент затухания (для каждого параметра на врезке показана карта распределения среднеквадр. отклонений).

Совершенствование методики диагностики технического состояния зданий и сооружений.

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.

Сегодня, для анализа напряженно-деформированного состояния и контроля динамических характеристик высотных зданий и сложных сооружений часто используется конечно-элементное (КЭ) моделирование. КЭ модели достоверно описывают поведение реальных конструкций при условии полного соответствия проектных параметров модели с характеристиками существующих строительных конструкций, что не всегда соблюдается на практике.

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 [Еманов и др., 2002]

(рис. 5). Проведенные ранее исследования показали, что частота собственных колебаний конструкций в значительной степени зависит от грунтовых условий, при увеличении категории грунтового основания (более мягкие грунты) частота смещается в низкую сторону. Также, выявлена зависимость динамических характеристик сооружений от наличия второстепенных конструкционных элементов (кирпичное заполнение каркаса и перегородок). В этом случае измеренная частота наоборот завышается, что приводит к завышенной оценке прочности здания по данным инструментальных обследований.



Рисунок 5. Блок-схема процедуры идентификации прочностных параметров зданий и сооружений.

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 Наличие численной КЭ оценки жесткости строительной конструкции. позволяет варьировать характеристиками конструктивных модели (например, жесткость перекрытий, наличие кирпичного элементов заполнения – рис. 6) и в результате производить подбор динамических параметров, в том числе и скорости распространения деформационных волн для модели.



Рисунок 6. а - модель здания с несущими элементами и кирпичным заполнением; б – модель только с несущими элементами; в - волновые формы распространения деформационных волн для модели.

В целом, методика заключается в минимизации функции отклонения (*OF*) модельных динамических параметров колебаний здания от измеренных (экспериментальных):

$$OF = (f_x^{model} - f_x^{expr})^2 + (f_y^{model} - f_y^{expr})^2 + (f_z^{model} - f_z^{expr})^2 + (V_x^{model} - V_x^{expr})^2 + (V_y^{model} - V_y^{expr})^2$$
(1)

где f_x^{model} , f_x^{expr} –численные и экспериментальные частоты мод колебаний; V_x^{model} , V_x^{expr} – численные и экспериментальные значения скорости деформационной волны.

Методика была апробирована на каркасном железобетонном здании. В качестве параметров идентификации приняты модули упругости бетона для плиты (п), колонны (к) и кирпичного заполнения (кп), образующие вектор искомых параметров x = (En, Ek, Ekn). Полученные в результате идентификации оптимальный вектор прочностных параметров модели содержит следующие значения модулей упругости бетона: для плиты $En = 8*10^5$ тс/м² (меньше проектного значения на 18%), для колонны $Ek = 3*10^6$ тс/м² (соответствует проектным значениям) и кирпичного заполнения Ekn=208000 тс/м² (соответствует проектным значениям).

Таким образом, выявлено, что при стандартном модальном анализе использование только частоты моды колебаний здания с несущими элементами и кирпичным заполнением может привести к завышению характеристик, прочностных ЧТО осложняет достоверную оценку сейсмоустойчивости. 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. Актуальность разрабатываемой методики определяется необходимостью введения инструментального контроля проектирования современных высотных зданий в сейсмоопасных регионах.

Концептуальное, экспериментальное и физико-химическое моделирование подъема мантийного флюида.

Разработана концептуальная и математическая модель образования и эволюции мантийно-корового мигранта (магмо- и/или флюидозаполненной полости), учитывающая реологию среды и сейсмоплотностные неоднородности профилей подъема.

Концептуальная модель заключается в следующем: 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_c растёт. Разность плотностей (R - D) приводит к тому, что по достижению камерой критической мощности L_{cr} избыточное давление в камере сравнивается с прочностью вышележащего барьера; в последнем происходит гидроразрыв, и вещество камеры заполняет образовавшуюся вертикальную полость. Образование мигранта контролируется следующим условием:

$$\int_{0}^{H+L_{c}} gR(H+L_{c})d(H+L_{c}) - \int_{0}^{H} gRHdH - \int_{H}^{H+L_{c}} gDL_{c}dL_{c} \ge S, \qquad (2)$$

где *g* – ускорение свободного падения. В выражении (2) 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. Существует три варианта развития событий в зависимости от величины объёма камеры и, соответственно, высоты образовавшегося мигранта *L*:

1) Объёма камеры достаточно для формирования мигранта с глубины H до поверхности ($L \approx H$). В этом случае происходит излияние вещества на дневную поверхность. Примером являются пермо-триасовые трапповые излияния на Сибирской платформе.

2) Объём камеры таков, что формируется мигрант, высота которого значительно превышает глубину залегания прочностного барьера (*L>H*), здесь происходит выброс (эксплозия) вещества мигранта с большим избыточным давлением на поверхность (пример – кимберлитовые «трубки взрыва»).

Расчеты избыточных давлений магмы с различным содержанием H₂O в образовавшемся мигранте для этих двух случаев представлены на рис. 7, а.

3) На рис. 7, б представлен случай существенно меньшего объема мигранта. Высота сформированного канала мигранта значительно меньше глубины залегания прочностного барьера (L < H), но разность плотностей

(*R*–*D*) достаточно высока для обеспечения подъемной силы. Мигрант может заполнять только полость, самостоятельно движущуюся вверх по модели, предложенной нами ранее [Жатнуев, 2005].



Рисунок 7. Расчетные параметры эволюции мигранта.

а, **б** – профили избыточных давлений в мигранте, образовавшемся на глубине 600 км: **a** – при исходной высоте мигранта, достаточной для прорыва на поверхность (L>H); **б** – при исходной высоте мигранта 10, 50 и 100 км (L<H); **в-ж** – профили скоростей подъема мигранта, рассчитанные по уравнениям: **в** – Ньютона; **г** – Фон Риттингера; **д** – Стокса; **е** – Аллена-Лященко; **ж** – Спера. Очевидно, что движение мигранта вверх в третьем случае возможно только при выполнении условия (1), иначе он останавливается и накапливается под очередным прочностным барьером формируя очаг, аналогичный исходной камере. Для расчёта скорости движения мигранта по различным реологическим профилям применимы теоретические и полуэмпирические формулы Ньютона, Фон Риттингера, Стокса, Аллена и Лященко, Спера и другие.

На рис. 7, в-ж приведены расчётные графики скоростей подъёма мигранта цилиндрической формы с исходной высотой 50 км от глубины 600 км. Содержание H₂O в веществе мигранта было принято равным 8.0 мас.%; реологический профиль учитывал хрупко-пластичный переход и пик прочности гипербазитов на поверхности Мохоровичича (40–50 км). На графиках (рис. 7, г-ж) хорошо прослеживается ускоряющееся повышение скорости с уменьшением глубины вследствие возрастания разности плотностей (R-D) и увеличения высоты мигранта, а также резкое падение скорости на прочностном барьере 40–50 км. Остальные неровности на графиках отмечают перепады плотности внешней среды. Особняком стоит график скорости по уравнению Ньютона (рис. 7, в), отличающийся от остальных как по своей форме, так и по абсолютным значениям скорости. Причиной этому служит отсутствие в данном уравнении учета разности плотностей (R-D) и других реологических параметров среды.

Математическая модель реализована на языке программирования C++ в виде платформы моделирования – новой версии программы Vladi Overpressure 4.0, позволяющей задавать входные параметры, функции и ограничения и получать на выходе численные и визуальные (2D) результаты. Существуют различные концептуальные подходы к расчету скорости подъема мигранта. В литературе часто рассматривается медленное «всплывание» мигранта в ньютоновской/бингамовской жидкости, либо заполнение веществом мгновенно образовавшейся субвертикальной трещины, либо перемещение путем гидроразрыва среды аналогично

методам, используемым в нефтедобыче. В предлагаемой новой программе возможен расчет на основе всех этих подходов. Дополнительными факторами, влияющими на расчетную скорость, являются понижение прочности в месте разрыва/раздвигания среды в результате влияния температуры, эффекта Ребиндера, а также химические процессы ассимиляции внешней среды веществом мигранта.

В результате получены следующие выводы:

1) Время τ , необходимое для формирования мантийно-корового мигранта, является функцией массы поступающего в первичную камеру глубинного вещества *m* в единицу времени *t*, разности плотностей внешней среды и поступающего вещества $\Delta \rho$, а также критической высоты камеры L_c :

$$\tau = f\left(\frac{dm}{dt}, \Delta \rho, L_c\right), L_c = f\left(V_c, a_c, b_c, \ldots\right).$$
(3)

Критическая высота камеры, в свою очередь, зависит от объёма камеры V_c и ее формы (т.е. линейных размеров $a_c, b_c, ...$).

2) Как показано в левой части неравенства (2), избыточное давление в исходной камере и мигранте прямо пропорционально их высоте и плотности вмещающей среды; обратно пропорционально плотности вещества мигранта. Согласно PREM-модели, плотность вмещающей среды зависит от глубины (давления), а также состава и строения её вещества.

3) Высота формируемого по механизму гидроразрыва мигранта зависит только от его формы и объема вещества исходной камеры. При недостаточности объема исходной камеры для образования «канала» до поверхности формируется мигрант - магмо- и/или флюидозаполненная замкнутая полость с высотой большей, чем высота исходной камеры. Когда избыточное давление в мигранте превышает прочность среды (при сохранении постоянными реологических условий) мигрант начинает движение в субвертикальном направлении. Комплексное моделирование процесса эволюции мантийно-корового мигранта, включившее в себя как создание физической модели, так и химико-термодинамические расчеты изменения вещества мигранта и внешней среды с привлечением программного комплекса «Селектор», позволило описать подъем мантийного флюида из зоны аномальной мантии в Байкальской рифтовой зоне Предложена модель химикотермодинамической эволюции поднимающегося мантийного флюида и вмещающих сред Байкальской рифтовой зоны (рис. 8).



8. Рисунок Химикотермодинамическая эволюция поднимающегося мантийного флюида и вмещающих пород Байкальской рифтовой зоны. Условные обозначения на литологическом разрезе: 1 – байкальская вода; 2 – осадки байкальской впадины, 3 мраморы; 4 – пластично-5 хрупкий nepexod; островодужный комплекс; 6аккреционный комплекс; 7 – гранулитовый комплекс; 8 – аномальная верхняя мантия (в модели: пиролит + H₂O + CH_4).

Определено поведение 10 химических элементов и 67 их различных соединений, возможных на разных участках пути подъема флюида. На пластично-хрупком переходе происходит резкое повышение pH раствора, большинство твердых фаз переходит в раствор, из которого осаждается кремнезем. В газовой фазе полностью исчезает водяной пар, сменяясь водородом. Попадая далее в 12 резервуар, представленный доломитовым мрамором, флюид его растворяет с отложением компонентов в 13 резервуаре (5 км, осадки байкальской впадины). В байкальскую воду, таким

образом, попадает лишь газовый флюид преимущественно метанового состава. Таким образом, генезис углеводородов, поступающих ко дну Байкала, объясняется взаимодействием поднимающегося флюида с нижнепротерозойскими и более поздними карбонатными комплексами фундамента Байкальской горной области.

Заключение

НИР по проекту проведены в контексте разработки геологогеофизических основ методов прогноза сейсмической опасности.

Продолжено исследование глубинного строения Байкальского рифта по данным комплексных геофизических наблюдений, включающих локальную сеть сейсмостанций, геомагнитные и электромагнитные пункты. В результате создана база геофизических данных, характеризующих параметры пространственно-временного распределения геофизических полей в сейсмоактивной области внутриконтинентального рифтогенеза. Полученные данные актуальны для разработки методов прогноза сейсмической опасности территорий Прибайкалья и Забайкалья.

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. Выявлено, что при стандартном модальном анализе использование только частоты моды колебаний здания с несущими элементами и кирпичным заполнением может привести к завышению прочностных характеристик, что осложняет достоверную оценку сейсмоустойчивости. Введение дополнительного волнового параметра позволяет, с одной стороны, однозначно рассчитать жесткость численной модели независимо от влияния второстепенных В (кирпичные конструктивных элементов здании перегородки И перемычки), с другой – провести инструментальные измерения этого

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

Разработана концептуальная и математическая модель образования и эволюции мантийно-корового мигранта (магмо- и/или флюидозаполненной полости), учитывающая реологию среды и сейсмоплотностные неоднородности профилей подъема. Комплексное моделирование процесса, включившее в себя как создание физической модели, так и химикотермодинамические расчеты изменения вещества мигранта и внешней среды, позволило описать подъем мантийного флюида из зоны аномальной мантии в Байкальской рифтовой зоне.

Полученные результаты в 2018 году 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.

Список использованной литературы

Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Голубова Н.С., Мерщикова Н.А., Пушкарёв П.Ю. Магнитовариационное зондирование: новые возможности // Физика Земли. 2003. №. 9. С. 3-30.

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. DOI:10.5800/GT-2017-8-4-0313

Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Дашевский Ю.А. Стратегия прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1484–1496.

Еманов А.Ф., Селезнёв В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчёт стоячих волн при детальных инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика. 2002. № 2. С. 192–207.

Жатнуев Н.С. Трещинные флюидные системы в области пластических деформаций // Доклады РАН, 2005, том 404, №3, с. 380-384.

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. doi:10.5800/GT-2016-7-1-0198.

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.

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.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М. Наука. 2003. 270 с.

Aki K., Chouet B. Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects // Journal of geophysical research. 1975. T. 80. №. 23. C. 3322-3342.

Kosarev G.L., Makeeva L.I., Vinnik L.P. Inversion of teleseismic P-wave particle motions for crustal structure in Fennoscandia // Phys. Earth Planet. Inter., 1987. V. 47. P. 11.

Mackie R.L., Smith J.T., Madden T.R. Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: The magnetotelluric example // Radio Science. 1994. T. 29. №. 04. C. 923–935.

Vosegaard K., Vestergaard P.D. A simulated annealing approach to seismic model optimization with sparse prior information // Gephys. Prospect. 1991. V. 39. P. 599–611.

Wennerberg L. Multiple-scattering interpretations of coda-Q measurements // Bulletin of the Seismological Society of America. 1993. T. 83. №. 1. C. 279– 290.

Zeng Y., Su F., Aki K. Scattering wave energy propagation in a random isotropic scattering medium: 1. Theory // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1991. T. 96. №. B1. C. 607–619.

Приложение. Количество научных публикаций в журналах, индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования (Web of Science, Scopus, MathSciNet, Российский индекс научного цитирования, Google Scholar, European Reference Index for the Humanities и dp.) по проекту за 2018 год:

Базаров А.Д., Лундэнбазар Б., Баранников В.Г. Результаты инженерносейсмометрического обследования 11-ти этажного здания серии КУБ-2,5 // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2018. № 5. С.23-26. (РИНЦ) V

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 (РИНЦ) V

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 (**DSCI WoS**) **Р**

2 (RSCI WoS) R

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: 10.1134/S1028334X18080263 (WoS, Scopus) Q4**

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 (WoS, Scopus) R**

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 (WoS, Scopus) Q4

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

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 (WoS, Scopus) Q4

Dobrynina A.A., Sankov V.A., Tcydypova L.R., German V.I., Chechelnitsky V.V., Ulzibat M. Hovsgol earthquake 5 December 2014, Mw=4.9: seismic and acoustic effects // J Seismology. 2018. V. 22, Is. 2. P. 377–389. **DOI:** 10.1007/s10050.017.0711 = (WeS. Second.) O2

10.1007/s10950-017-9711-z (WoS, Scopus) Q3

Moroz Yu.F., Loginov V.A. The deep geoelectrical section of the Avacha-Koryak zone of contemporary volcanism, Kamchatka // Doklady Earth Sciences. 2018. Vol. 482. Part 2. pp. 1370-1374. **DOI: 10.1134/S1028334X18100264** (WoS, Scopus) Q4

Глава в монографии

Sankov V.A., Dobrynina A.A. (2018) 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. P. 599-618. **DOI: 10.1007/978-3-319-77359-9_27 (WoS) R**

Патенты, свидетельства

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018613010. Российская Федерация. GEnvelope – программа для расчета параметров затухания сейсмических волн методом огибающей коды / Предеин П. А., Добрынина А. А., Тубанов Ц. А.; правообладатели: ФГБУН

ИЗК СО РАН, ФГБУН ГИН СО РАН. – №2018610136; дата поступления: 09.01.2018; дата регистрации: 01.03.2018. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 3. – 1 с.

2. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2018621104. Российская Федерация. Динамические характеристики строительных конструкций Республики Бурятия / Базаров А. Д.; правообладатель ФГБУН ГИН СО РАН. – №2018620786; дата поступления: 13.06.2018; дата регистрации: 18.07.2018. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 7. – 1 с.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018664295. Российская Федерация. Vladi Distat – программа для расчёта двумерных распределений физических полей и вязкости земной коры / В.И. Васильев, Н.С. Жатнуев, Е.В. Васильева; правообладатель ФГБУН ГИН СО РАН (RU). – №2018662448; заявл. 06.11.2018; зарегистр. 14.11.2018; опубл. 14.11.2018. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 11. – 1 с.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018664801. Российская Федерация. Vladi Collision – программа моделирования коллизии литосферных плит / В.И. Васильев; правообладатель ФГБУН ГИН СО РАН (RU). – № 2018662091; заявл. 01.11.2018; зарегистр. 22.11.2018; опубл. 22.11.2018. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 12. – 1 с

Руководитель проекта, Тубанов Ц.А. Тел: +89148407668

Ħ

зав.лаб., к.г.-м.н.