Федеральное агентство научных организаций ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 550.34 № гос. рег. 01201282369 Инв. № 5



ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

III.78.2.1. Изучение и контроль методами активного и пассивного геофизического мониторинга сейсмогенерирующих сред и инженерных объектов Прибайкалья (заключительный)

Номер проекта в ИСГЗ ФАНО 0340-2014-0005

<u>Приоритетное направление VIII.78</u>. Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий

<u>Программа VIII.78.2</u>. Тектонофизика современных геодинамических процессов как основа прогноза природных катастроф во внутриконтинентальных условиях

Протокол Ученого совета № 12 от «15» декабря 2016 г.

Научный руководитель темы, к.г.-м.н.

подпись

Ц. А. Тубанов

Улан-Удэ, 2016

Список исполнителей

Научный руководитель, зав. лаб., к.гм.н.		Ц. А. Тубанов
Исполнители темы в.н.с., д.гм.н.		Ю. Ф. Мороз
н.с., к.т.н.	подпись	А. Д. Базаров
н.с., к.гм.н.		Л. Р. Цыдыпова
М.Н.С.	подпись	П. А. Предеин
м.н.с., к.фм.н.	Afuna	А. А. Добрынина

подпись

Реферат

Отчет, 26 стр., 13 рис., 4 источника, 3 прил.

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ, ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ, ТЕЛЕСЕЙСМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ, ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ, ДОБРОТНОСТЬ, СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ, СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Объектом исследования являются сейсмоопасные территории Прибайкалья и Забайкалья.

Цель - исследование физических закономерностей эволюции сейсмичности, процессов подготовки землетрясений и оценка сейсмического воздействия на строительные сооружения и инженерные объекты с использованием методов мониторинга геофизических характеристик сейсмогенерирующих сред и инженерных объектов.

Проведен анализ скоростной структуры земной коры по телесейсмическим записям локальной сети сейсмостанций. Разработаны геоэлектрические модели очаговых областей сильных землетрясений. Получены данные характеризующие распределение латеральных неоднородностей в земной коре, с использованием методов исследования добротности литосферы.

С использованием географических информационных систем проведена разработка проекта системы инженерно-сейсмометрического мониторинга инженерных объектов Прибайкалья. Исследования включают как оценку инженерно-геологических условий расположения зданий и сооружений, так и оценку динамических характеристик самих строительных конструкций. Использована и усовершенствана инструментальная диагностика зданий и сооружений методом стоячих волн. Особенностью применяемой метода является оценка динамических характеристик исследуемого объекта, объемное представление распределения дефектов, возможность масштабирования системы наблюдения.

Содержание

Нормативные ссылки	4
Определения, обозначения и сокращения	5
Введение	7
1. Исследование сейсмического режима сейсмоактивных областей Байкальского рифта,	
сопоставление и анализ данных комплексного геофизического мониторинга	8
2. Разработка региональной количественной шкалы сейсмического воздействия на	
строительные сооружения и инженерные объекты	18
Заключение	21
Список использованных источников	23
Приложение А	24
Приложение Б	25
Приложение В	26

Нормативные ссылки

В настоящем отчете о НИР использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 7.32-2001 Межгосударственный стандарт. Система стандартов по информации,

библиотечному и издательскому делу, отчет по научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления;

ГОСТ 1.5—93 Государственная система стандартизации РФ. Общие требования к построению, изложению, оформлению и содержанию стандартов

ГОСТ Р 22.0.11-99 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Предупреждение природных чрезвычайных ситуаций. Термины и определения

ГОСТ Р 22.1.02—95 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование.

СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах.

ГОСТ Р 8.596-2002.ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.

ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. - М.: Стандартинформ, 2010-96 с.

ГОСТ 22690-88. Определения прочности механическими методами неразрушающего контроля. -М.: Изд-во стандартов, 1988. - 25 с.

Определения, обозначения и сокращения

В настоящем отчете о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями, обозначениями и сокращениями:

Афтершоки (after- после, shock - толчок) – серия более слабых сейсмических толчков, следующих после основного толчка землетрясения из одной с ним очаговой области, как правило, более слабые по энергии.

База данных – систематизированный набор данных, необходимых для решения некоторого класса задач или относящихся к определенному объекту, явлению.

Геоинформационная система (географическая информационная система, ГИС) – система сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных данных и связанной с ними информации о необходимых объектах.

Добротность – характеристика свойств колебательной системы (и среды), степень сохранения амплитуды колебаний.

Инверсия – преобразование геофизических полей в физические модели среды.

Импеданс электродинамический – комплексное волновое сопротивление. Сопротивление в волновых электродинамических процессах; включает активное сопротивление току проводимости и реактивное сопротивление токам смещения; волновое сопротивление.

Магнитные вариации - изменения во времени геомагнитного поля, обусловленные существованием как внутренних, так и внешних по отношению к поверхности Земли источников магнитного поля. Магнитные вариации с периодами от секунды до нескольких лет обусловлены электрическими токами в ионосфере и магнитосфере Земли. Единица измерения – наноТесла (нТл).

Метод функции приемника (англ. receiver function method) – расчет горизонтальнослоистых моделей скоростной структуры на основании подбора теоретических функций приемника к наблюдаемым, обусловленным вступлениями обменных поперечных волн, образующихся на сейсмических границах в районе регистрации.

Обменные волны – волны, образующиеся на границах в недрах Земли, при прохождении через них объемных (продольных и поперечных) волн от природных или искусственных источников (в данном случае от далеких землетрясений).

Сейсмическая опасность – максимальные сейсмические воздействия, возникающие с определенной вероятностью на заданной территории в заданном интервале времени и связанные с повторяемостью землетрясений.

Сейсмостойкое строительство – строительство, осуществляемое в районах, подверженных землетрясениям, с учетом воздействия на здания и сооружения сейсмических (инерционных) сил.

5

Сейсмические волны – колебания, распространяющиеся в Земле от природных или искусственных источников.

Продольные и поперечные волны (Р и S -волны) – объемные сейсмические волны, в которых колебания частиц среды совершаются вдоль и перпендикулярно направления распространения волн.

Энергетический класс землетрясения (Кр) – условная мера энергии, выделившейся из очага землетрясения в виде сейсмических волн. Зависит от амплитуды сейсмических волн в продольной и поперечной волне и от расстояния до эпицентра землетрясения. Эта характеристика энергии землетрясения используется в основном в России и эквивалентна магнитуде.

Введение

Сейсмичность обладает определенной организацией – структурой, проявляющейся в неравномерности распределения землетрясений в пространстве-времени-энергии. Природа структуры сейсмичности в настоящее время окончательно не ясна. Известные подходы к ее объяснению отражают как сложность проблемы, так и явный недостаток эмпирических данных о закономерностях формирования полей напряжений и деформаций. Проводимые ГИН СО РАН многолетние исследования физических закономерностей эволюции сейсмичности и процессов подготовки землетрясений центральной части Байкальского рифта на основе геофизической сети наблюдений позволяют проводить комплексный анализ сейсмического процесса с учетом особенностей глубинного строения Байкальской рифтовой зоны. Используется цифровая автоматическая аппаратура, функционирующая в режиме круглогодичных наблюдений. Часть сейсмостанций укомплектована широкополосными сенсорами СМG-40Т (фирма Гуралп) и цифровыми регистраторами «Иркут» (разработка ГИН СО РАН). На данный момент в сети работают 5 широкополосных станций. Действующая сеть сейсмостанций структурно дополняет региональную сеть сейсмологических станций Прибайкалья. Также в состав сети мониторинга виброисточник ЦВО-100, входит мощный сейсмический магнитовариационные И магнитотеллурические станции.

Оценка сейсмического риска урбанизированной территории представляет собой сложную задачу требующей комплексного подхода к её решению. Комплексный подход заключается в исследовании: динамических характеристик основных типов массовой городской застройки; отражение технического состояния здания в динамических характеристиках; оценки критериев влияния грунтового основания на микросейсмическое влияние на здания и сооружения.

1. Исследование сейсмического режима сейсмоактивных областей Байкальского рифта, сопоставление и анализ данных комплексного геофизического мониторинга.

По данным каталога землетрясений локальной сети сейсмостанций ГИН СО РАН, за период 2001-2014 годы, определены параметры сейсмического режима, характеризующего сейсмичность очаговых областей Байкальского рифта.

В 2001-2014 годах в центральной части Байкальского рифта и Прибайкалья зарегистрировано и обработано 25685 землетрясений, из них с энергетическим классом (Кр) больше 12,5 – всего шесть землетрясений (рис. 1). При сводной обработке землетрясений использовались данные 25 сейсмостанций БФ ГС РАН, 10 цифровых станций локальной сети ГИН СО РАН и БурФ ГС РАН.



Рисунок 1. Землетрясения за 2001-2014 гг.

С помощью средств статистической обработки временных рядов был произведен анализ сейсмичности центрального Байкала (с 01.01.2001 по 31.12.2014). Для оценки репрезентативности выборки построено распределение повторяемости событий. Линейность логарифма частоты событий от логарифма энергии соблюдается в диапазоне энергетических классов 7 – 9 (что соответствует закону повторяемости Гутенберга-Рихтера). Таким образом, выборки событий в

этом энергетическом диапазоне приняты за репрезентативный эквивалент для исследования статистических закономерностей сейсмического режима.

Для полученной выборки событий произведен расчет коэффициента наклона закона повторяемости по годам. Динамика изменения этого коэффициента является одной из главных характеристик сейсмического режима. На рисунке 2 видно, что из общей тенденции выделяется аномалия, соответствующая 2008 году. В мае 2008 г. произошло землетрясение энергетического класса 14.1 (эпицентр в Баргузинском заливе), сопровождавшееся большим количеством афтершоков. Сейсмическая активизация в этом районе продолжается и по настоящий день.



Рисунок 2. Годичные коэффициенты наклона графика повторяемости.

Исследуемая область Среднего Байкала условно разделена на 3 зоны: Селенгинская зона, Ольхонская зона, Баргузинская зона. Сейсмичность отдельных зон оценивалась по плотности вероятности количества событий в 30-ти дневном временном окне. Плотности вероятности для Селенгинской и Ольхонской зон более сравнимы с нормальным распределением (рис. 3а, в). Математическое ожидание для этих статистик соответственно 8 и 4 событий за 30 дней. Для Селенгинской зоны дисперсия составила 9.0, для Ольхонской зоны - 7.8. Небольшая дисперсия свидетельствует об относительной стационарности сейсмического фона в этих зонах, для этих территорий отсутствуют временные промежутки, в которых количество землетрясений аномально велико по сравнению со среднестатистическим.

Для Баргузинской зоны (рис. 36) математическое ожидание составляет 6 событий за 30 дней; дисперсия - 20.3, что значительно выше статистических характеристик других зон. На графике распределения наблюдаются аномальные значения значительно превышающие пределы дисперсии, они связаны с роевыми, форшоковыми и афтершоковыми последовательностями землетрясений. Такое сложное распределение вносит большой вклад для статистики среднего Байкала в целом, здесь за 30 дней происходит в среднем 23 события энергетических классов 7 – 9 с дисперсией 36.27.



Рисунок 3. Плотности вероятности частоты событий в 30-ти дневном временном окне: а – Средний Байкал, б – Баргузинская зона, в – Селенгинская зона, г – Ольхонская зона.

Аномалии по частоте происходящих событий 7 – 9 энергетических классов могут использоваться как индикатор сейсмичности территории. Для анализа динамики сейсмичности предложен индикатор на основе стандартного отклонения от скользящей средней. Параметрами для расчета служит тип стандартного отклонения (обычно двойное), период скользящей средней и графически представляемых в виде т.н. границ (линий) Боллинджера. Эта характеристика была разработана для исследования временных рядов финансового рынка. Адаптация этого метода для параметризации вариаций сейсмического режима состоит в следующем:

основной временной ряд представлен количеством землетрясений энергетических классов
 7 – 9 во временном окне величиной 5 дней;

- средняя линяя представляет скользящую среднюю по 100 дням в пределах точки основного ряда;

- верхняя граница - двойное стандартное отклонение от скользящей средней по 100 дням в пределах точки основного ряда.

Так, для Баргузинской зоны рои землетрясений, по количеству выходящие за верхнюю границу Боллинджера, заметно коррелируют с усилением сейсмичности в этой области (рис. 4). В динамике средней линии заметна некоторая периодичность.



Рисунок 4. Вариации количества (красная линия) сейсмических событий (Кр 7 – 9) в Баргузинской очаговой зоне: черная линия - средняя скользящая по 100 дням, желтая линия - двойное стандартное отклонение от скользящей средней, синие маркеры - землетрясения Кр> 10.

Для исследования динамики сейсмических процессов в пространстве построены карты изолиний по частоте сейсмических событий за каждый год. На временных срезах сейсмичности на фоне ориентированной вдоль оси рифта сейсмоактивной структуры четко прослеживается участки с устойчивым расположением эпицентров землетрясений (рис. 5).



Рисунок 5. Плотность сейсмических событий 7-9 энергетических классов зоны центрального Байкала.

Полученные статистические и качественные характеристики сейсмичности являются основой для построения геомеханической модели эволюции напряженного состояния очаговых областей Байкальского рифта. Впервые, по данным пяти широкополосных сейсмостанций ГИН СО РАН, расположенных в центральной части Байкальского рифта, с использованием методики совместного обращения обменных волн Ps и Sp, получены глубинные распределения скоростей Vp, Vs и их отношения (Vp/Vs) для земной коры и верхней мантии до глубин 300 км. Оптимальная модель в используемом методе функции приемника определяется путем нахождения глобального минимума целевой функции, минимизация осуществляется способом "simulated annealing", входящим в группу методов Монте-Карло.

Существующие на данный момент методики [1, 2] позволяют по записям телесейсмических землетрясений восстанавливать скоростную структуру в окрестности сейсмостанции до глубин 300 км. Луч, исходящий от землетрясения, произошедшего на расстояниях 2000-9000 км, подходит к регистрирующей станции почти вертикально, с углом сноса менее 20 градусов, просвечивая непосредственно под и в окрестности станции скоростную структуру. Согласно методике, нами отобраны записи землетрясений со всевозможных направлений, с расстояний от 30 до 90 градусов и магнитудой (Mb) не менее 5.5 по четырем станциям сети – Котокель (2014), Максимиха (2013-2014), Степной Дворец (2009-2012), Улан-Удэ (2007-2008, 2010-2012). Широкополосные записи отфильтрованы для устранения слишком больших периодов (>20 с), на которых ослабляется разрешение, и слишком коротких (<1 с), уменьшающих эффективность выделения из-за случайного рассеяния волн на мелких неоднородностях. Исходные трехкомпонентные сейсмограммы Z, N, E преобразованы в записи системы координат L, Q, T, соответствующих максимальной энергии каждой из регистрируемых сейсмостанцией волн P, SV и SH. Для исключения различия в магнитуде, функций в источниках землетрясений и влияния неоднородностей на пути между источником и областью приема выполнена стандартизация записей (применена деконволюция). Для нивелирования шумов и подчеркивания влияния регулярных неоднородностей проведено суммирование деконвольвированных трасс. При суммировании все события приведены к среднему эпицентральному расстоянию 65°. В результате суммирования (рис. 6 слева внизу) выделяются фазы, связанные с границей Мохо, на времени 4,85 сек, с мантийной границей на глубине 410 км на времени 44,56 сек и с мантийной границей на глубине 660 км на времени 69,41 сек. Время T(P410s), равное 44,56 сек, больше соответствующего времени для модели IASP91 на 0,56 сек, что может свидетельствовать о пониженных скоростях волн в верхней мантии.

Инверсией приемных функций до глубины h = 300 км рассчитаны скорости продольных и поперечных сейсмических волн, а также их отношения. Станционные модели Vp(h), Vs(h) благодаря примерно 20 градусному наклону используемых сейсмических лучей скоростные разрезы дают информацию и о глубинных структурах под горными районами. На рис. 6

12

представлены результаты, полученные путем совместного обращения данных *P- и S-receiver functions* по данным за 2013-2014 гг., зарегистрированными сейсмостанцией Максимиха.



Рисунок 6. Скорости продольных и поперечных волн и отношение скоростей в коре и верхах мантии по результатам совместной инверсии приемных функций в районе сейсмостанции МХМ (справа), карта эпицентров землетрясений, вошедших в инверсию (слева вверху), стек PRF, где красным обозначены сигналы от границ раздела (внизу слева).

Скоростные разрезы коры и верхней мантии Р- и S-волн и отношение скоростей их скоростей Vp/Vs с глубиной изображены в правой части рисунка 6. Красные линии определяют интервалы, в которых варьируют скорости в соответствующих интервалах изменения глубин. Скачок скорости S волны от 3.3 км/с до 4.0 км/с и скорости Р волны от 6.9 км/с до 7.7 км/с соответствует градиентной границе Мохо на глубинах 35-40 км. Распределение цветов в области допустимых значений изменения параметров отражает гистограмму распределения скорости Р и S волн, соответствующие модели IASP91. В правом рисунке черная линия представляет априорное распределение отношения Vp/Vs с глубиной. По распределению поперечных волн по глубине выделяется астеносферный выступ на глубинах 40 – 70 км, ниже выделяется слой пониженной скорости в верхней мантии от 70 до 140 км.

Полученные результаты являются новыми. Нами впервые проведено совместное обращение приемных функций продольных и поперечных волн и получены скоростные разрезы коры и верхней мантии до глубин 300 км по Р- и S-волнам. Ранее по методике [3] нами были рассчитаны зависимости скоростей S-волн для сейсмостанции МХМ до глубин 260 км, где был также прослежен мощный слой пониженных скоростей в верхней мантии на глубинах 70 - 160 км в

диапазонах азимутов BAZ = 247–261°, скорости которого к юго-востоку от станции (BAZ=122– 164°) уменьшаются вдвое [4].

Для регионов Южного Прибайкалья и Забайкалья выполнена оценка затухания сейсмических волн с помощью разных подходов: оценка добротности по кода-волнам (Q_C), метод нормализации к коде для прямых продольных (Q_P) и поперечных(Q_S) волн. Параметры затухания (значения сейсмической добротности (Q_0), ее зависимости от частоты (частотный параметр, n) и коэффициента затухания) рассчитывались для отдельных тектонических структур исследуемой территории (рифтовые впадины, горные поднятия, Сибирская платформа), а также для профилей, пересекающих исследуемую территорию в разных направлениях (рис. 7).



Рисунок 7. Взаимное расположение эпицентров выбранных землетрясений и сейсмических станций для расчета затухания по кода-волнам (вверху) и по прямым волнам (внизу слева). Пронумерованными прямоугольниками показаны отдельные тектонические структуры: 1 –

Восточно-Саянское горное поднятие, 2 – Хамар-Дабанский блок, 3 – Тункинская система впадин, 4 – зона Главного Саянского разлома, 5 – Сибирская платформа, 6 – Южно-Байкальская впадина (южная часть), 7 – Южно-Байкальская впадина (северная часть). Внизу слева показано положение сейсмических профилей от станций Хурамша (HRM, показаны сплошными линиями) и Турунтаево (TRT, показаны пунктиром). Окружностью выделены эпицентры промышленных взрывов. Справа – зависимости добротности объемных P- и S-волн от частоты для разных профилей.

В результате для территории южного Прибайкалья и Забайкалья получены определения сейсмической добротности и ее частотной зависимости (частотного параметра) по прямым объемным *P*-, *S*- и кода-волнам. Значения сейсмической добротности по коде на частоте 1 Гц варьируются в пределах $84\div134$, а частотного параметра – от 0,84 до 1,10. Для прямых *P*- и *S*-волн значения добротности и частотного параметра значительно меняются для разных профилей: $Q_P=32\div154$, $n=0.85\div1.39$, $Q_S=66\div360$, $n=0.62\div1.58$ (рис. 7).

При детальном рассмотрении соотношений параметров затухания для отдельных тектонических блоков отмечаются некоторые важные особенности. Одна из наблюдаемых тенденций состоит в том, что как затухание, так и частотный параметр снижаются для древних стабильных областей, то есть зависят от возраста консолидации земной коры. Для кода-волн минимальное затухание характерно для докембрийской Сибирской платформы. Несколько ниже добротность литосферы для нижнепалеозойского Хамар-Дабанского блока. Вместе с тем, отмечается существенное снижение добротности древних участков коры при внедрении в них рифтогенеза – область сейсмически активного Восточно-Саянского блока, процессов относящегося к вендскому Тувино-Монгольскому микроконтиненту, отличается повышенным затуханием сейсмических волн. Те же тенденции прослеживаются при расчете затухания в локальных областях, непосредственно прилегающих к сейсмическим станциям. Максимальное затухание и раздробленность среды наблюдаются для кайнозойских рифтовых впадин (Q варьируется в пределах 98÷114, n=0,87÷0,96, Хамар-Дабанский и Забайкальский блоки характеризуются умеренным затуханием сейсмических волн (Q=115÷127, n=0,81÷0,91). Горное поднятие Восточного Саяна и Сибирская платформа отличаются наименьшим затуханием сейсмических волн и раздробленностью среды – Q=119÷131, n=0,76÷0,79.

Те же латеральные неоднородности отмечаются и при анализе затухания объемных Р- и Sволн, оценки которого получены для станций Хурамша и Турунтаево (см. рис. 7): наименьшее затухание объемных сейсмических Р- и S-волн получено для южной части Забайкальского блока (профиль 5, см. рис. 7). Максимальное затухание наблюдается для профиля 4, проходящего через Забайкальский блок в восточном (юго-восточном) направлении. Для профилей 1 и 2, пересекающих Южно-Байкальскую рифтовую впадину в западном и северо-западном направлениях, наблюдается стабильно высокое затухание как для продольных, так и для

15

поперечных волн (см. рис. 7). Профиль 3, также проходящий частично через северную часть Южно-Байкальскую впадину и через Забайкальский блок, характеризуется умеренным затуханием. При этом необходимо отметить, что профили 1 и 2 пересекают Южно-Байкальскую впадину вкрест основных структурных нарушений, в то время как профиль 3 проходит вдоль них.

Методом глубинного магнитотеллурического зондирования изучена электропроводность литосферы до, и после землетрясения. сильнейшего Олюторского землетрясения с М=7.6. Установлено, что в результате события произошло изменение злектропроводности литосферы в районе двух разломов в зоне очага землетрясения. Оно выразилось уменьшением аномалии повышенной электропроводности, связываемой с глубинным разломом (МТЗ № 209). выраженным на дневной поверхности сейсмотектоническим разрывом протяженностью почти 80 км. При этом возросла по размерам и глубине аномальная зона высокой проводимости в литосфере в (МТЗ № 176), которая связывается с глубинным разломом, находящим отражение на дневной поверхности в виде сейсмотектонического разрыва протяженностью около 140 км (рис. Предполагается, что в результате землетрясения уменьшилась 8). трещиноватость И обводненность пород литосферы в зоне первого разлома, но заметно возросла трещиноватость и обводненность пород в зоне второго разлома



Рисунок 8. Геоэлектрический разрез литосферы по данным МТЗ после землетрясения: 1 – пункт МТЗ и его номер; 2 и 3 – гипоцентры Олюторского землетрясения и его афтершоков.

Электромагнитным зондированием изучено глубинное строение района сложнейшего тектонического узла Южной Камчатки в области сочленения Центрально-Камчатский прогиба, Срединного и Ганальского выступов кристаллического фундамента. На основе разработанных методов интерпретации и численного моделирования создана геоэлектрическая модель литосферы. В геоэлектрическом разрезе земной коры и верхней мантии выявлены субвертикальные, изометричные и субгоризонтальные аномалии повышенной и пониженной электропроводности. Интерпретация аномалий выполнена с привлечение данных гравиметрии, магнитометрии и сесмотомографии. Это дало возможность оценить пористость пород в районе коровой аномалии повышенной электропроводности Ганальского выступа. Природа коровой аномалии связывается с гидротермальными растворами и магматическими расплавами.

Методом. аудиомагнитотеллурического зондирования (АМТЗ) впервые изучен район современного извержения Толбачинского вулкана. С помощью современных методов анализа и численного моделирования магнитотеллурического поля разработана геоэлектрическая модель земной коры в районе прорыва магматических расплавов им С. И. Набоко. В геоэлектрическом разрезе верхних частей земной коры выявлена проводящая неоднородность, связываемая с разломом, по которому флюиды поступали к дневной поверхности. Установлено, что земная кора на глубинах 15-35 км содержит проводящую зону, связываемую с магматическими расплавами и гидротермальными растворами. По данным АМТЗ, МТЗ и другой геолого-геофизической информации составлена концептуальная модель района, характеризующая возможную природу аномальных зон. Даны приближенные оценки пористости пород в разломной зоне, по которой магматические расплавы поступали в вышележащие толщи в районе прорыва им. С. И. Набоко.

По данным мониторинга электромагнитного поля Земли с 2001 по 2016 гг. на побережье Авачинского залива Восточной Камчатки, где по долгосрочному прогнозу ожидается катастрофическое землетрясение, изучена динамика электропроводности литосферы в нескольких пунктах по профилю протяжённостью 200 км. В поведении временных рядов полугодовых значений электропроводности литосферы в большей мере в период с 2012 по 2016 г.г. проявились изменения в п. Шипунский, который находится вблизи сейсмофокальной зоны (рис. 9). Выявленные изменения электропроводности литосферы связываются с влиянием проводимости зон разломов, которая, по – видимому, меняется из-за наличия минерализованных растворов при сжатии и растяжении земной коры при геодинамических процессах в зоне субдукции. Изменения электропроводности литосферы из-за влияния проводимости разломов подтверждены данными численного трёхмерного моделирования. магнитотеллурического поля. Не исключается вероятность аномального увеличения электропроводности в п. Шипунский в последние годы в связи с подготовкой катастрофического землетрясения в Авачинском заливе, согласно долгосрочному прогнозу Федотова С.А.

17



Рисунок 9. Временные ряды среднегодовых значений кажущегося электрического сопротивления и фазы импеданса на периоде 900 с в пунктах Верхняя Паратунка (а), Тундровый (б) и Шипунский (в); 1 и 2 – кажущееся электрическое сопротивление и фаза импеданса в направлениях вкрест и по простиранию сейсмофокальной зоны.

2. Разработка региональной количественной шкалы сейсмического

воздействия на строительные сооружения и инженерные объекты.

Разработан проект пространственно-ориентированной базы данных характеристик сейсмического воздействия для урбанизированной территории (на примере г. Улан-Удэ).

Застройка г. Улан-Удэ характеризуется большим числом старых типовых панельных и новыми кирпичных зданий разнотипными сооружениями, И включая уникальные большепролетные сооружения расположенных на площадках с различными геологическими условиями. Для территории г. Улан-Удэ выбраны здания представители массовой застройки города: типовые проекты 135С, 114-02С, 1-335БК, новые каркасно-монолитные сооружения, также характеристики большепролетного измеренные динамические уникального спортивного представители жилой застройки расположены в различных сооружения ФСК. Здания геологических условиях и различными категориями технического состояния. Для каждого типа здания получены динамические характеристики (рис. 10) состоящие из: передаточных функций по трем компонентам (X,Y,Z); эпюр вертикальных прогибов здания; скоростей распространения сейсмических волн вдоль здания; коэффициенты усиления сейсмических колебаний; декрементов затухания.



Рисунок 10. Типовое каркасное здание новой застройки г. Улан-Удэ (вверху – слева). Динамические характеристики здания: эпюра первой формы (вверху – справа); передаточные функции для продольного (внизу – слева) и поперечного направления (внизу – справа).

С помощью метода конечных элементов в пакете моделирования ANSYS проведено численное исследование поведения динамических характеристик каркасного здания в зависимости от типа грунтового основания. Показано, что грунтовое основание здания является частью динамической системы грунт-здание. Рассчитаны собственные частоты каркаса здания в зависимости категории грунтового основания: конгломераты; грубообломочные породы; пески мелкозернистые

Ранее, при обследовании здания школы № 40 (г. Улан-Удэ), полученные динамические параметры не соответствовали расчетным значениям, имели заниженное значение частоты собственных колебаний. В спектре вертикальных колебаний выделились устойчивые вертикальные колебания всего здания в целом (рис. 11). Согласно расчетам, полученные данные

свидетельствовали о недостаточной жесткости грунтового основания или неправильно подобранном типе фундамента. Проведенные геофизические работы подтвердили локальное ослабление грунтового основания здания школы № 40 вследствие замачивания грунтовыми водами. Таким образом, выявлено что, что пониженное значение собственных частот является показателем технического состояния зданий и сооружений и существует зависимость динамики здания от грунтового основания.



Рисунок 11. Спектр вертикальных колебаний здания школы № 40.

Проведено численное исследование поведения динамических характеристик каркасного здания в зависимости от типа грунтового основания. Показано, что грунтовое основание здания является частью динамической системы грунт-здание (рис. 12), что проявляется в зависимости собственных частот колебания здания от типа грунтового основания.



Рисунок 12. Расчетная схема системы «сооружениегрунтовое основание».

С помощью метода конечных элементов в пакете моделирования ANSYS рассчитаны собственные частоты каркаса здания (рис. 12) в зависимости категории грунтового основания: конгломераты; грубообломочные; пески мелкозернистые (табл. 1).

При численном моделировании установлено, что для каркасного здания простой конструктивной схемы, расположенного на грубообломочных грунтах (II категория), частоты первой и третий форм колебания уменьшаются на 7%, относительно здания этой же

конструкции построенного на скальных грунтах (І категория). В случае же с песчаным основанием (III категория), частоты первой и третий форм колебаний изменяются еще сильнее, на 50%. При

вертикальных колебаниях зависимость частота - грунт имеет также сильную зависимость, частоты уменьшились на 50%. При этом частота второй формы изменяется менее чем на 10% (рис. 13).

Таблица 1.

Категория грунтового основания	Vs м/с	Первая форма, Гц	Вторая форма, Гц	Третья форма, Гц	Вертикальная форма, Гц
Ι	700	4.7	8.4	14.4	15.5
II	300	4.1	8.3	13.8	13.4
III	150	2.54	8.2	11.1	8.1

Зависимость собственных частот колебания здания от грунтовых условий.

Сделан вывод, что частоты первой и третий формы сильно зависят от жесткости грунтов, тем самым не могут быть индикаторами технического состояния здания без учета грунтового основания; вторая форма колебания наименее зависима от грунтового основания; показателями ослабления жесткости грунтов может являться снижение частоты вертикальных колебания и сближение резонансных пиков второй и третий формы.



Рисунок 13. Изменения частот колебания в зависимости от категории грунтового основания (слева – горизонтальные, справа – вертикальные колебания).

Заключение

В результате выполнения проекта получены следующие наиболее значимые результаты.

Произведено картирование сейсмоактивного слоя в центральной части рифта на основе детальной локализации очагов землетрясений по данным за период 2001-2011 гг. Изучены особенности распределения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн, как в сейсмоактивном слое, так и в выше лежащей толще пород земной коры, позволяющие сделать оценки трехмерной структуры распределения скоростных параметров.

Исследованы процессы группирования сейсмичности. Выявлено, что положение роев и групп землетрясений более четко трассирует линейные структуры сейсмогенных разломов земной

коры, по сравнению с всем потоком землетрясений. Предположено, что механизм генерации роевых групп землетрясений может быть связан с инжекцией воды в область активных трещин. Зафиксирована сезонная периодичность слабых землетрясений с характерным изменением периодов во времени. Предложены индикаторы сейсмоактивности, основанные на статистических характеристиках. Полученные статистические и качественные характеристики сейсмичности являются основой для построения геомеханической модели эволюции напряженного состояния очаговых областей Байкальского рифта.

Впервые, с использованием методики совместного обращения обменных волн Ps и Sp, получены глубинные распределения скоростей Vp, Vs и их отношения (Vp/Vs) для земной коры и верхней мантии до глубин 300 км. Оптимальная модель определяется путем нахождения глобального минимума целевой функции, минимизация осуществляется способом "simulated annealing". Анализ скоростной структуры земной коры проведен по данным пяти широкополосных сейсмостанций ГИН СО РАН, расположенных в центральной части Байкальского рифта, что позволяет в комплексе с результатами обработки наблюдений близких землетрясений получить новую информацию о распределении скоростей поперечных сейсмических волн в земной коре.

Получены параметры распространения сейсмических волн в дальней зоне сейсмического вибратора ЦВ100 по данным регистрации с использованием сейсмических антенн. Для снижения влияния сезонных факторов в ближней зоне излучения, предложено исследовать параметры поверхностных волн, генерируемых непосредственно вибратором.

По данным многолетних наблюдений геомагнитного поля по сети пунктов в Байкальской рифтовой зоне изучены вековые вариации. Выявлены изменения среднегодовых значений полного вектора геомагнитного поля с 2003 по 2011 гг. Предполагается, что эти изменения могут быть вызваны активизацией геодинамических процессов на Байкале, которые проявились сильнейшим Култукским землетрясением 2008 года. По вариациям геомагнитного поля в диапазоне периодов от первых минут до первых часов получены частотные кривые магнитного типпера. Интерпретация указанных кривых выполнена с привлечением трёхмерного и двумерного численного моделирования. В поведении вещественных типперов на периодах 150 - 300 с проявилось аномальное возмущение, которое может быть связано с Култукским землетрясением. Сделано проникновением предположение, что природа аномалии связана высокоминерализованных растворов в разломные зоны.

Проведено практическое применение разработанного аппаратно-программного комплекса для задач постоянного и периодического мониторинга динамических характеристик инженерных сооружений. Для постоянного мониторинга показана стабильность и постоянство передаточной функции, выбранной в качестве основного показателя динамических характеристик. Определены зависимости технического состояния зданий от инерционного и конструкционного

22

демпфирования. Экспериментально выявлена и подтверждена численным моделированием зависимость значения собственных частот зданий от жесткости грунтового основания. Выявлено, что появление вертикальных колебаний массива здания свидетельствует о снижении прочности грунтов или неправильно подобранном типе фундамента. Определены критерии характеризующие зависимость реакции здания на сейсмическое воздействие в зависимости от параметров грунтового основания, а именно: частоты первой и третий формы сильно зависят от жесткости грунтов, тем самым не могут быть индикаторами технического состояния здания без учета грунтового основания; вторая форма колебания наименее зависима от грунтового основания; показателями ослабления жесткости грунтов может являться снижение частоты вертикальных колебания и сближение резонансных пиков второй и третий формы. С использованием географических информационных систем проведено формирование системы инженерносейсмометрического мониторинга инженерных объектов Прибайкалья. Определено, что работы с целью оценки сейсмической опасности должны включать как оценку инженерно-геологических условий расположения зданий и сооружений, так и оценку сейсмоустойчивости самих строительных конструкций.

Список использованных источников

- Vinnik, L.P. Detection of P to SV in the mantle / L.P. Vinnik // Phys. Earth planet. Inter. 1977. V. 15. – P. 39–45.
- Farra, V. Upper mantle stratification by P and S receiver functions / V. Farra, L.P. Vinnik // Geophys. J. Int. – 2000. – V. 141. – P. 699–712.
- Мордвинова, В.В. Исследование скоростной структуры литосферы на Монголо-Байкальском трансекте 2003 по обменным SV-волнам / В.В. Мордвинова, А. Дешам, Т. Дугармаа, Ж. Девершер, М. Улзийбат, В.А. Саньков, А.А. Артемьев, Ж. Перро // Физика Земли. – 2007. – №2. – С. 11–23.
- Ананьин, Л.В. Скоростное строение коры и верхней мантии Байкальской рифтовой зоны по долговременным наблюдениям широкополосных сейсмостанций / Л.В. Ананьин, В.В. Мордвинова, М.Ф. Гоць, М. Канао, В.Д. Суворов, Г.И. Татьков, Ц.А. Тубанов // – ДАН. – 2009. – Т. 428. – №2. – С. 211-214.

Приложение А. Публикации за 2016 г.

Монографии

Нефедьев, М.А. Физические свойства горных пород и руд месторождений и рудных полей Западного Забайкалья / М.А. Нефедьев. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2016. – 200 с.

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 др.) по проекту за 2016 год:

1. Добрынина А.А., Саньков В.А., Предеин П.А., Чечельницкий В.В., Тубанов Ц.А. Неоднородности поля затухания сейсмических волн на территории Южного Прибайкалья и Забайкалья // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2016.Т. 17. С. 46–63. http://elibrary.ru/item.asp?id=26597778

2. Массальский О.К., Гилева Н.А., Хайдурова Е.В., Тубанов Ц.А. Прибайкалье и Забайкалье / Землетрясения в России в 2014 году. Обнинск: ГС РАН, 2016, С. 37-42. http://elibrary.ru/item.asp?id=26575907

3. Мороз Ю.Ф., Логинов В. А. Геоэлектрическая модель района Толбачинского извержения имени 50-летия ИВиС // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 27-36. http://elibrary.ru/item.asp?id=26810484

4. Мороз Ю.Ф. Изменения электропроводности литосферы в зоне субдукции // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467 № 6. С. 704-708. <u>http://elibrary.ru/item.asp?id=27048783</u>

5. Татьков И.Г., Татьков Г.И., Бадерин А.М., Татьков П.Г., Астахов Н.Е., Зуккау Г.Л. Применение комплексных геофизических работ для изучения месторождений молодого неравносвесного урана в Витимо-Каренгском районе // Разведка и охрана недр, 2016, № 7, с. 40-46 <u>http://elibrary.ru/item.asp?id=26385433</u>

6. Melnikova V.I., Seredkina A.I., Radziminovich Ya.B., Melnikov A.I., Gilyova N.A., Tubanov Ts.A. The Zagan Earthquake of February 1, 2011, in the Low-Seismoactive Zone of Western Transbaikalia: Observations and Analysis // Seismic Instruments, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 290–300. http://elibrary.ru/item.asp?id=25630203

7. Moroz, Yu. F.; Moroz, T. A.; Loginov, V. A.; и др. The changes in the electric conductivity of the lithosphere in the source region of the strongest Olyutora earthquake in the Koryak highlands // IZVESTIYA-PHYSICS OF THE SOLID EARTH Том: 52 Выпуск: 1 Стр.: 29-44 2016 http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=1& SID=N2X7DyXkKeEs8F4gzVd&page=3&doc=24

Патенты, авторские свидетельства

Аппаратно-программный комплекс регистрации сейсмических колебаний и определения динамических характеристик инженерных сооружений: пат. полезная модель Рос. Федерация / Базаров А.Д. – № 2016139821/28; заявл. 10.10.2016.

Приложение Б. План НИР 2013-2016 гг.

Год	Содержание работы	Ожидаемый результат
2013	Разработка методики локализации очагов землетрясений для трехмерно- неоднородных сред Центрального Байкала. Проведение цикла вибросейсмических, электромагнитных наблюдений на сети стационарных и временных станций в центральной части Байкальского рифта. Определение структуры единой БД комплексной оценки инженерно- геологических, гидрогеологических, сейсмотектонических, геофизических условий поселений Прибайкалья.	 Будет выполнен анализ пространственно- временных изменений вибросейсмического и электромагнитных полей в центральной части Байкальского рифта. На примере г.Улан-Удэ с использованием современных ГИС технологий будет разработана структура базы данных для комплексной оценки природных и техногенных опасностей поселений Прибайкалья.
2014	Исследование физических закономерностей эволюции сейсмичности и процессов подготовки землетрясений на основе наблюдений данных локальной сети наблюдений, виброзондирований с использованием вибратора ЦВ-100, режимных наблюдений вариаций естественных геомагнитных и электромагнитных полей. Оценка сейсмического воздействия на строительные сооружения и инженерные объекты.	 Будут выявлены особенности сейсмического режима, характеризующие изменения напряженно-деформированного состояния земной коры. Произведена оценка фазовочастотных параметров виброизлучения по данным сети стационарных сейсмостанций. Будет определен характер временных вариаций геомагнитного поля в зависимости от данных по глубинной электропроводности. На основе модального метода обследования зданий выявлены критерии, определяющие категории технического состояния типовых зданий в связи с сейсмическим риском.
2015	Исследование методами геофизического мониторинга глубинного строения и структурно-вещественных неоднородностей сейсмоактивных областей Байкальского рифта. Разработка геофизической информационной системы инженерно- сейсмометрического мониторинга зданий и сооружений.	1.Построена модель неоднородностей сейсмоактивного интервала и распределения очагов землетрясений в объеме земной коры Среднего Байкала по данным локальной сети наблюдений. 2.Разработана методика построения карт сейсмической опасности в формате ГИС по данным сейсморайонирования территорий и микродинамического обследования инженерных объектов.
2016	Исследование сейсмического режима сейсмоактивных областей Байкальского рифта, сопоставление и анализ данных комплексного геофизического мониторинга. Разработка региональной количественной шкалы сейсмического воздействия на строительные сооружения и инженерные объекты.	Построена модель сейсмического процесса по данным локальной сети сейсмостанций. Параметры модели сопоставлены с данными комплексного геофизического мониторинга. Определены критерии, характеризующие реакцию типовых зданий при сейсмическом воздействии в зависимости от грунтовых условий Забайкалья.

Приложение В.

индикатор	Ед. измерения	Всего за 2013-2016 гг.	2013	2014	2015	2016
Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации проекта	единиц	49	20	8	14	7
Количество публикаций в мировых научных журналах, ндексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science)	единиц	18	6	2	6	4
Число охраняемых объектов интеллектуальной собственности: зарегистрированных патентов в России	единиц	3		1	1	1 подана заявка на полезную модель с положительным решением на выдачу охранного документа