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



ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

ПРОЕКТ II.2П/IX.128-7. Активизации сейсмического процесса в областях добычи, производства и транспорта энергоресурсов в Сибири: тенденции развития на основе регулярных инструментальных наблюдений (заключительный)

Номер проекта в ИСГЗ ФАНО 0340-2015-0028

Комплексная программа фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН № II.2П «Интеграция и развитие»

IX.128. Физические поля, внутреннее строение Земли и глубинные геодинамические процессы

Научный руководитель темы, к.г.-м.н.

Ц. А. Тубанов

Улан-Удэ, 2017

Список исполнителей

Научный руководитель, зав. лаб., к.гм.н.	<u>20.11.2017</u>	_ Ц. А. Тубанов
Исполнители темы в.н.с., д.гм.н.	20.11.2017 подпись, дата	_ Ю. Ф. Мороз
н.с., к.т.н.	20.11.2017 подпись, дата	_ А. Д. Базаров
н.с., к.гм.н.	<u>20.11.2017</u> подпись, дата	_ Л. Р. Цыдыпова
М.Н.С.	<u>Тид</u> 20.11.2017 подпись, дата	П. А. Предеин
м.н.с., к.фм.н.	Juna 20.11.2017	_ А. А. Добрынина

подпись, дата

Содержание

	Стр.
Реферат	1
Нормативные ссылки	2
Введение	2
Основные результаты	3
1. Комплексный анализ геофизических полей (геомагнитных, электромагнитных)	
в связи с вариациями сейсмического режима в очаговых областях Байкальского	
рифта	3
2. Исследование афтершоковых и роевых последовательностей землетрясений по	
данным локальной сети сейсмостанций в центральной части Байкальского рифта.	7
Заключение	10
Список использованной литературы	11
Приложение А	12

Реферат

Отчет, 12 стр., 10 рис., 8 ист., 1 прил.

АКТИВИЗАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ОБЛАСТЯХ ДОБЫЧИ, ПРОИЗВОДСТВА И ТРАНСПОРТА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В СИБИРИ: ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ РЕГУЛЯРНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ.

Целью работы по проекту является исследование активизаций сейсмического процесса в земной коре по данным сети геофизических станций, расположенных в центральной части Байкальской рифтовой зоны.

Таким образом поставленные задачи включали как комплексный анализ геофизических полей (геомагнитных, электромагнитных), так и исследование особенностей пространственного распределения сейсмичности, которые можно коррелировать с вариациями геофизических полей.

Наблюдения геомагнитного и электромагнитного поля проведены на сети стационарных геомагнитных и магнитотеллурических наблюдений. В результате исследован характер вековых геомагнитных вариаций. Проведен анализ данных трехкомпонентных наблюдений геомагнитного поля посредством использования расчетов магнитного типпера. По данным магнитотеллурических наблюдений получены данные о глубинной электропроводности литосферы.

С использованием методов кластерного анализа был проведен анализ динамики сейсмического процесса. Выявлено, что группирующиеся события могут быть индикаторами напряженно-деформированного состояния земной коры. Предложена программа анализа затухания сейсмических волн методом нормализации. Разработанный модуль является частью разрабатываемой программно-алгоритмической системы интерактивного анализа сейсмограмм и каталогов группирующихся землетрясений. Использование программы «CodaNorm» позволяет получить значения сейсмической добротности для локальных и региональных землетрясений и взрывов, рассчитать эмпирическую зависимость затухания от частоты, оценить временные вариации поглощения в очаговых областях сильных землетрясений.

Ключевые слова: землетрясения, земная кора, глубинное строение, электромагнитное поле, магнитотеллурические зондирования, электропроводность, сейсмические волны, группирование событий, добротность.

1

Нормативные ссылки

Настоящий отчет о НИР составлен с использованием Государственного стандарта ГОСТ 7.32-2001 в редакции 07.09.2005 г.

Введение

В работах [1-5] установлена информативность частотно-временных преобразований вертикальной и горизонтальной составляющих электрического поля в связи с геодинамическими процессами в Байкальской рифтовой зоне. Проблемы поиска аномальных электромагнитных эффектов, связанных с землетрясениями, обусловлены тем, что наблюдения часто осуществляются на небольших площадях по редкой сети и в кратковременные интервалы времени. Наряду с этим крайне ограничены или практически отсутствуют сведения об электропроводности геологической среды в пунктах наблюдений, что не даёт возможности определить возможную природу эффектов в электромагнитном поле и электропроводности геологической среды.

Дискретный и эпизодический характер проявления природной сейсмичности накладывает существенные ограничения на исследования вариаций геофизических полей, коррелируемые с сейсмическим режимом. Слабая сейсмичность, несомненно, более тесно связана с геолого-геофизическими характеристиками земной коры. В рамках проекта поставлена задача разработать методы обработки сейсмологических данных в целях комплексного анализа данных геофизических наблюдений и сейсмологии землетрясений.

Содержание работы в 2016-2017 г. по проекту:

• Комплексный анализ геофизических полей (геомагнитных, электромагнитных) в связи с вариациями сейсмического режима в очаговых областях Байкальского рифта.

 Исследование афтершоковых и роевых последовательностей землетрясений по данным локальной сети сейсмостанций в центральной части Байкальского рифта.
Планируемый результат выполнения работы в 2016-2017 г. по проекту:

• По данным геомагнитного и электромагнитного мониторинга в очаговых областях Среднего Байкала и сопредельной территории Западного Забайкалья построены ряды вариаций геомагнитного и электромагнитного типпера.

По данным долговременного сейсмологического мониторинга в очаговых областях
Среднего Байкала определены основные параметры группирования землетрясений.

2

Основные результаты

1. Комплексный анализ геофизических полей (геомагнитных, электромагнитных) в связи с вариациями сейсмического режима в очаговых областях Байкальского рифта.

Специально для целей средне и краткосрочного прогноза землетрясений Геологическим институтом СО РАН проводилось поэтапное развитие локальной системы мониторинга напряженного состояния среды. Главными особенностями локальной системы наблюдений (рис. 1) являлось: совмещение сейсмического мониторинга в пассивном (регистрация землетрясений) и активном (вибросейсмическое зондирование) вариантах; комплексность наблюдений (помимо сейсмологических, выполняются магнитометрические, электромагнитные наблюдения); автоматический режим регистрации.



Рисунок 1. Сеть комплексных геофизических наблюдений в области Среднего Байкала.

Инструментальные наблюдения вариаций геомагнитного поля выполняются ГИН СО РАН с 2000 года в пунктах «Хурамша», «Надеино», «Степной Дворец», «Сухой Ручей». Для мониторинга используются магнитовариационные станции MB-01 и MB-02. С 2000 года регистрация осуществляется с дискретностью 2 мин, точность наблюдений составляет 0,1 нТл. В пункте «Надеино» регистрируются компоненты (H, D, Z) и полный вектор геомагнитного поля (F), в остальных – только полный вектор (рис. 2). Так же в обработке использовались данные обсерватории «Патроны» за 2000-2015 гг. с дискретностью 1 минута в формате IAGA2002 Института солнечно-земной физики СО РАН [6]. Первичная обработка данных геомагнитного мониторинга сводилась к удалению помех и выбросов, нормирования, интерполяции и последующего осреднения временных рядов. Для анализа вариаций геомагнитного поля в различных частотных диапазонах исходные временные ряды пересчитывались в среднечасовые, среднесуточные и среднегодовые значения.



Рисунок 2. Схема расположения пунктов геомагнитных и электромагнитных наблюдений, 1 – пункты тектономагнитного мониторинга ГИН СО РАН, 2 – пункты МТЗ, 3 – обсерватория «Патроны».

Анализ среднегодовых значений напряжённости геомагнитного поля в пунктах наблюдений позволяет сделать следующие выводы (рис. 3a, 3б): 1) Понижение среднегодовых значений, наблюдавшееся до 2008 года включительно, сменилось увеличением. 2) Для пункта наблюдения «Надеино» уменьшение среднегодовых значений с 2001 по 2008 гг. на 28 нТл, сменилось увеличением на 44 нТл в течение 2008-2015 гг. 3) Для обсерватории «Патроны» за тот же период значения напряжённости геомагнитного поля составили 15 и 54 нТл.



Рисунок 3. а - вековая вариация полного вектора геомагнитного поля за 1970-2015 гг., «Патроны»; б - полный вектор геомагнитного поля за 2001-2015 гг., «Надеино».

Рассчитанные разности среднегодовых значений напряженности магнитного поля между пунктами наблюдения и обсерваторией «Патроны», за 2001-2008 гг. имеют следующие значения: для пункта «Сухой ручей» разность составляет порядка 4 нТл, для п. «Хурамша» – 8 нТл, и для п. «Надеино» – 13 нТл. По значениям, полученным для последующего периода 2008-2015 гг. можно говорить об уменьшении абсолютной величины разности. Так,

максимальное значение за соответствующий период получено для пункта «Надеино», и составило 10 нТл. Возрастание величин напряженности геомагнитного поля вкрест простирания Байкальского рифта, в направлении от пункта «Патроны» к «Надеино», говорит о региональном характере этого явления (рис. 4).



Рисунок 4. Разность среднегодовых значений напряжённости магнитного поля между пунктами наблюдений.

Ряды Н-, D-, Z-составляющих геомагнитного поля, зарегистрированные в пунктах «Патроны» и «Надеино» были использованы для определения компонент индукционной матрицы Визе-Паркинсона [7]. В результате расчетов для данных пунктов наблюдения были получены вещественная (ReW) и мнимая (ImW) часть магнитного типпера и их азимуты. Значение типпера характеризует связь вариаций вертикальной составляющей геомагнитного поля с горизонтальными составляющими в пункте наблюдения, полученные значения для которых имеют следующие особенности. На периодах от 100 до 1000 с вещественные типперы, полученные для пунктов наблюдения, направлены в сторону Байкальской впадины. На этих периодах они имеют различную длину и азимут, что свидетельствует о влиянии проводящих зон, залегающих на разных глубинах. В пункте «Патроны» вещественный типпер *ReW* имеет максимум на периоде 1000 с, такой период волны приблизительно соответствует ее распространению на расстояние более 100 км. Предполагается, что поведение векторов индукции в рассматриваемом диапазоне периодов связано с рифтовой зоной. В пункте «Надеино», находящемся на расстоянии около 80 км от оз. Байкал, максимум вещественного типпера имеет значение 0.3 на периоде 120 с; азимут типпера – 330°, максимум мнимого типпера отмечен на периоде примерно 700 с. Вещественный и мнимый типперы почти коллинеарны в высокочастотной области, что также указывает на наличие вытянутой проводящей зоны.



В пункте «Надеино» по данным наблюдений магнитотеллурического поля помошью с программы [8] получена кривая магнитотеллурического зондирования в диапазоне периодов от 5 до 10000 секунд, характеризующая электропроводность литосферы глубины до примерно 150 км (рис. 5).

Рисунок 5. Кривые МТЗ (Rk) в пункте «Надеино» по ортогональным направлениям (a – NS, б – EW).

Полярные диаграммы импеданса свидетельствуют о сильной геоэлектрической неоднородности среды (рис. 6). Электропроводность литосферы в северо-западном направлении почти на три порядка превышает электропроводность в юго-восточном направлении. Выявленная геоэлектрическая неоднородность электромагнитного поля на низких частотах может быть связана с разломом, проникающим в литосферу на большие глубины. Верхний относительно проводящий слой имеет интегральную проводимость 10-15 Сим. Мощность слоя, по-видимому, составляет от 0,8 до 1 км. По предварительным данным литосфера региона содержит проводящий слой на глубинах 100-150 км. Вариации геомагнитного поля на периодах 100 и 1000 с приурочены к максимуму кривой МТЗ, характеризующей высокоомный слой литосферы. Литосфера по сравнению с озера Байкал отличается повышенным электрическим сопротивлением.



Рисунок 6. Полярная диаграмма тензора импеданса на частоте 700 секунд, «Надеино».

2. Исследование афтершоковых и роевых последовательностей землетрясений по данным локальной сети сейсмостанций в центральной части Байкальского рифта.

По данным локальной сети наблюдений за период 2001 – 2011 годы установлено, что большинство слабых землетрясений локализуются в виде обособленных в пространстве линейных групп (рис. 7). Наиболее представительная группа эпицентров располагается полосой вдоль восточного берега оз. Байкал. Характерной чертой сейсмичности является наличие групп, роев землетрясений.

Разработан алгоритм выделения групп землетрясений. Для исследования характера группирования сейсмичности первоначально построены карты плотности землетрясений за 11 лет в скользящем окне с элементарной ячейкой 5 х 5 км. Выявлены пространственные зоны, где сконцентрировалось от 50 и больше землетрясений за весь период. Площадь выделенных зон составила 8,5% от области исследования. Далее, в каждой из этих зон проанализировано развитие сейсмического процесса во времени, выделены периоды с наибольшей частотой происхождения землетрясений. Таким образом, отобраны группы сейсмических событий (кластеров), характеризующихся концентрацией по площади и повышенной частотой генерации во времени (рис. 8).



Рисунок 7. Сейсмичность области сейсмоактивной Центрального Байкала за 2001-2011 годы по данным станиий локальной сети. Пунктиром выделена область исследования. Внизу, во врезке станций, показана сеть использованных для эпицентров локализации землетрясений.



Рисунок 8. Кластеры (группы) землетрясений за период 2001-2011 гг. Кластеры выделены разным цветом (цифрой указан номер кластера).

Изучение параметров очагов группирующихся событий проведено по данным базы данных цифровых записей локальной сети наблюдений. Подход, избранный нами, разделяет сбор (регистрацию

данных) и обработку данных, что позволяет использовать модульный принцип организации программного обеспечения.

Сформированная база сейсмологических данных за период 2001-2011 г.г. включает в себя как данные (рис. 9), так и средства обработки и визуализации сейсмограмм, графиков и картографической информации.



Рисунок 9. Структура базы сейсмологических данных локальной сети наблюдений.

В основу положена модульная структура автоматизации на базе среды программирования Python, которая имеет большое количество математических и графических библиотек, и не уступающий в скорости обработки данных своим аналогам. Другим достоинством данного языка является возможность его встраивания в любые приложения. При разработке приложений для обработки сейсмограмм были использованы библиотеки математической обработки numpy и scipy, графический пакет matplotlib, библиотека обработки временных рядов scikits.timeseries. В качестве базы данных используется SQLite, для связи её с Django используется технология ORM (Object-relational mapping — объектнореляционное отображение), позволяющая связывать таблицы базы данных с объектами и классами языка программирования.

Разработан программный модуль CodaNorm (рис. 10). Эта программа является свободно распространяемым сейсмологическим программным обеспечением и предназначена для оценки затухания сейсмических волн локальных и региональных землетрясений и взрывов. Полученные в результате характеристики поглощения (сейсмическая добротность, частотный параметр, декремент затухания) могут использованы для получения поправок к моделям затухания сотрясений от землетрясений на трассах от сейсмоактивных зон, а также для расчета искусственных акселерограмм и оценки параметров колебаний при возможных сильных землетрясениях.



Рисунок 10. Программа анализа затухания сейсмических волн методом нормализации. а – сейсмограмма, используемая для анализа данных, б – блок –схема программы, б – кривые добротности.

Программа CodaNorm позволяет методом нормализации к коде рассчитывать сейсмическую добротность (Q_P , Q_S), частотный параметр (n) и декремент затухания (γ) объемных продольных и поперечных волн для различных частотных диапазонов, задаваемых оператором. В качестве исходных данных используются: 1. Волновые формы землетрясений (сейсмограммы) в формате GSE2; 2. Текстовый файл, содержащий данные о времени землетрясения, координатах, времени прихода прямых сейсмических волн (P- и S-волн), а также указание пути к папке с волновыми формами. В результате расчетов в программе «CodaNorm» оператор получает текстовый файл с полученными значениями амплитуд для расчета сейсмической добротности (Q_P , Q_S), а также файлы в растровом формате, визуализирующие процесс обработки сейсмограммы для каждой сейсмической станции.

Расчет параметров заключается в считывании исходных данных: событий из каталога и времен вступлений прямых волн, поиск данных с волновыми формами в формате GSE2, предварительной фильтрации пропускающим фильтром Баттерворта в четырех октавных полосах с заданными центральными частотами. После фильтрации для каждого частотного диапазона вычисляются среднеквадратические значения амплитуд по P-, S- и кода-волнам по вертикальной и горизонтальным компонентам. Опционально в выходной папке создаётся изображение с визуализацией расчета: все каналы исходной и отфильтрованной сейсмограммы и выделенные участки взятых окон.

Заключение

В результате проведенной НИР проведена разработка методов интерпретации и численного моделирования геоэлектрической модели литосферы, получены данные характеризующие электропроводность и электромагнитные неоднородности в литосфере Байкальского рифта. В пункте «Надеино» по данным наблюдений магнитотеллурического поля изучена электропроводность литосферы до глубины примерно 150 км. Верхний относительно проводящий слой имеет интегральную проводимость 10-15 Сим. Мощность слоя 0,8-1км. Литосфера содержит проводящий слой на глубинах 100-150 км. Характерно, что электропроводность литосферы в северо-западном направлении почти на три порядка превышает электропроводность в юго-восточном направлении. Выявленная геоэлектрическая неоднородность на низких частотах электромагнитного поля может быть связана с разломом, проникающим в литосферу на большие глубины. Разрез литосферы в окрестности пункта наблюдений «Надеино» (Забайкалье) по сравнению с пунктами вблизи оз. Байкал (Байкальский рифт) отличается повышенным электрическим сопротивлением.

Для оценки параметров режима естественной сейсмичности сейсмоактивных территорий важной задачей является разработка программно-алгоритмической среды

10

интерактивного анализа данных. Пакет программ CodaNorm был опробован авторами для оценки затухания сейсмических волн в центральной части Байкальского рифта. В результате, полученные значения сейсмической добротности Q_P , Q_S были наибольшими для сейсмических трасс, направленных вдоль Байкальского рифта, что физически объясняется существующей структурой разломов. Были получены значения частотного параметра n > 1, согласующиеся с ранее полученными данными для районов с высокой тектонической активностью, в том числе для Байкальского рифта

Список использованной литературы

1. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Магнитовариационные исследования в районе озера Байкал // Физика Земли. 2006. № 11. с. 93-98.

2. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Моги Т. Методика и результат мониторинга естественного электрического поля Земли в Байкальской рифтовой зоне// Физика Земли. 2007. № 11. С. 37-49.

3. Мороз Ю. Ф., Мороз Т. А. Магнитотеллурическое зондирование Байкальского рифта. В кн: Электромагнитное зондирование Земли. Санкт-Петербург. Изд-во СПТГУ. 2011. С. 265-268.

4. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Буглова С.Г. Вертикальная и горизонтальная составляющие электротеллурического поля на оз. Байкал и их связь с электропроводностью среды// Физика Земли. 2008. № 3. С. 73-83.

5. Мороз Ю. Ф. Изменения геомагнитного поля и магнитного типпера в Байкальской рифтовой зоне / Мороз Ю. Ф., Татьков Г. И., Мороз Т. А., Тубанов Ц. А., Предеин П. А. // Геофизические исследования. 2013. Т. 14. №3. С.10-23.

6. International Real-time Magnetic Observatory Network [Электронный ресурс] // INTERMAGNET Data Download. URL: <u>http://intermagnet.org/data-donnee/download-eng.php</u> (дата обращения 28.04.2016).

7. Мороз Ю.Ф., Напылова О.А. Краткосрочные предвестники землетрясений в вариациях низкочастотных магнитотеллурических матриц// Вулканология и сейсмология. 1993. № 5. С. 67-76.

8. Larsen I. C. Robust smooth magnetotelluric transfer functions / Larsen I.C., Mackie R. L., Manzella A., Fiodelisi A., Rieven S. // Geophys. J. Inter. 1996. V. 124. P.801–819.

Приложение А. 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 2016-2017 года:

 Мороз Ю.Ф., Смирнов С.Э., Назарова З.А. Аномальные изменения вертикального геомагнитного поля на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2016.
№ 4 (15). С. 80-85. <u>http://elibrary.ru/item.asp?id=27294959</u>

Predein P.A., Dobrynina A.A., Tubanov Ts.A., German E.I. CodaNorm: A software package for the body-wave attenuation calculation by the coda-normalization method // SoftwareX. 2017. V.
P. 30–35. <u>Doi: 10.1016/j.softx.2016.12.004.</u>