**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершенным в 2016 г.
в соответствии с планом НИР института**

**Проект НИР 0315-2014-0003** «Математическое моделирование, разработка новых численных методов, алгоритмов и программ для задач активной сейсмологии и дистанционного зондирования»

Номер государственной регистрации НИР 0120.0712227.

Научные руководители: д.т.н. Ковалевский В.В., д.т.н. Пяткин В.П.

**Раздел 1.** Математическое моделирование, разработка новых численных методов, алгоритмов и программ в задачах активной сейсмологии, экспериментальные исследования по вибросейсмическому зондированию и вибромониторингу среды. Моделирование и исследование взаимодействия сейсмических и акустических волновых полей вибрационных и взрывных источников с целью оценивания экологических рисков. Разработка новых алгоритмов и программ обработки данных вибромониторинга на основе регистрации малыми сейсмическими группами. Исследования волновых вибросейсмических полей и их связи с геодинамическими процессами в Алтае-Саянском регионе, Байкальской рифтовой зоне, сопредельных районах Монголии и в зонах вулканических структур. Развитие научной информационно-аналитической системы на базе Интернет-технологий для задач активной сейсмологии.

Руководитель – д.т.н. В.В. Ковалевский.

В ходе выполнения работы по проекту развита вычислительная технология для задач численного моделирования сейсмических полей в неоднородных упругих средах. Технология включает в себя адаптированный численный метод для трехмерного моделирования, разработанный параллельный алгоритм и его программную реализацию. Для проведения вычислений используется конечно-разностный метод второго порядка аппроксимации. Разработанное программное обеспечение ориентировано на проведение вычислительных экспериментов с использованием многоядерных вычислительных систем с гибридной архитектурой с GPU. Математическое моделирование полных волновых полей выполнено на базе разработанных математических моделей для скоростных разрезов экспериментов BEST и PASSCAL на трассе Байкал – Улан-Батор, Монголия. Для математического моделирования использовались программы моделирования полных волновых полей на основе аналитического метода для математической модели эксперимента BEST, спектрально-разностного метода и метода конечных разностей для модели эксперимента PASSCAL. Проведены тестовые расчеты для разработанных моделей.

В части подготовки экспериментальных данных для сравнительного анализа с теоретическими сейсмограммами создана база вибрационных сейсмограмм, полученных в ходе экспериментов по полевой регистрации вибросейсмического поля вибратора ЦВ-100 на профиле Бабушкин, Байкал – Кяхта - Улан-Батор, Монголия на расстояниях от 67 км до 500 км от источника. Эти работы проводились ИВМиМГ СО РАН совместно с ГИН СО РАН, БурФ ГС СО РАН и ЦАГФ АНМ.

Данные, полученные в ходе эксперимента по полевой регистрации вибросейсмического поля вибратора ЦВ-100 на профиле Бабушкин – Кяхта - Улан-Батор были внесены в базу метаданных и файловый архив сейсмограмм информационно-вычислительной системы (ИВС), входящей в состав НИС «Активная сейсмология». Всего в файловый архив было внесено около 1000 файлов сейсмотрасс, а соответствующие метаданные внесены в базу данных экспериментов. Для повышения качества зашумленных сейсмотрасс они были предварительно обработаны с помощью специально адаптированного программного обеспечения на основе пространственной фильтрации. Проведен анализ и сравнение результатов математического моделирования и вибросейсмического зондирования земной коры в Байкало-Монгольском регионе для верификации существующих скоростных моделей.

Выполнено сравнение результатов расчетов теоретических сейсмограмм для модели эксперимента BEST с экспериментальными результатами, полученными при вибросейсмическом зондировании на профиле Байкал – Улан-Батор. Лучшее согласование теоретических сейсмограмм и экспериментальных данных для волн наибольшей амплитуды получено для значения скорости продольных волн Vp = 6.65 км/с в нижнем слое земной коры, которое характерно для континентальной коры Азиатской плиты.

Выполнена разработка методов измерения и обработки вибросейсмических колебаний нанометрового уровня на расстояниях до 500 км от виброисточников с целью увеличения разрешающей способности активного вибрационного мониторинга. Разработан эффективный алгоритм кинематической фильтрации широкополосных вибросейсмических сигналов, зарегистрированных малыми сейсмическими группами. Повышение отношения сигнал/шум достигается за счет селекции полезных волн в заданном интервале пространственных частот и подавления волн-помех вне этого интервала. Программное обеспечение, разработанное на основе этого алгоритма, позволило повысить точность выделения сейсмических фаз на вибрационных сейсмограммах, зарегистрированных на профиле Бабушкин–Сухэ-Батор–Дархан–Улан-Батор протяженностью 500 км. Для повышения точности измерения фазы при вибросейсмическом зондировании на монохроматических сигналах был разработан оригинальный алгоритм адаптивной пороговой фильтрации. Тестирование алгоритма на синтетических сигналах показало его высокую эффективность в условиях сильных помех.

Рассмотрена многофакторная задача оценивания влияния геоэкологических рисков от мощных природно-техногенных взрывов на природную среду. Решение ее во многом связано с необходимостью изучения метеозависимых процессов распространения инфразвука в атмосфере, которые могут приводить к многократному возрастанию рисков. В целях достижения наиболее полного решения задачи распространения с учетом множества метеофакторов выбран метод натурного моделирования возбуждения и распространения волн с использованием сейсмических вибраторов, способных излучать наряду с сейсмическими волнами акустические в виде строго повторяющихся сеансов зондирования атмосферы. На трассе протяженностью 50 км набрана представительная статистика результатов измерений уровней акустических давлений от вибратора ЦВ-40 в разных метеоусловиях.

Выделены характерные особенности метеозависимых результатов измерений, которые потенциально могут вносить наибольший вклад в увеличение экологических рисков от мощных взрывов. Рассмотрена аналитическая зависимость акустического давления от таких метеопараметров, как температура и влажность воздуха, направление и сила ветра. Впервые в экспериментах с вибратором ЦВ-40 с учетом закономерности дальнего распространения инфразвука в атмосфере расширен предел высокоуровневой регистрации акустических колебаний до 100 км. Полученные на базе наблюдений оценки позволяют охарактеризовать затухание акустических волн, влияющих на уровни экологических рисков. По отношению к полигонным взрывам утилизируемых боеприпасов в экспериментах получены метеозависимые оценки удельной плотности энергии и проведено их сопоставление с критически допустимыми по строительным и санитарным нормам.

Актуализирована база экспериментальных данных ИВС «Вибросейсмическое зондирование Земли», входящая в состав НИС «Активная сейсмология». База данных пополнена экспериментами 2011-13 гг. по вибросейсмическому просвечиванию Байкало-Монгольского региона. Общее количество вновь введенных трасс – около 1000, объем – 385 МБ. Построена онтология предметной области «Активная сейсмология» путем развития и достройки двух базовых онтологий – онтологии научной деятельности и онтологии научного знания. Онтология содержит понятия моделируемой области, связывающие их отношения, атрибуты понятий и отношений и ограничения на значения атрибутов. Для построения онтологии активной сейсмологии была использована технология, разработанная в Лаборатории искусственного интеллекта ИСИ СО РАН, которая включает язык описания онтологий, методику построения и развития онтологий, а также редактор онтологий. За основу построения иерархии предметов и методов исследования послужила предложенная академиком Н.Н. Пузыревым типизация, которая была существенно расширена специфическими для предметной области активной сейсмологии понятиями. Наиболее важными ассоциативными отношениями между понятиями онтологии научной деятельности и онтологии научного знания являются следующие отношения: «исследует» — сопоставляет научную деятельность или раздел науки с объектом исследования; «использует» — связывает метод исследования с видом деятельности, исследователем или разделом науки; «применяется к» — связывает метод исследования с объектом исследования; «описывает» — задает связь публикации с научным результатом, объектом или методом исследования.