

**АННОТИРОВАННЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ  
О РЕЗУЛЬТАТАХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ, ВЫПОЛНЕННЫХ  
НА ЭТАПЕ № 1**

«Теоретические исследования поставленных перед НИР задач»

*Соглашение № 8670 от 21 сентября 2012 г.*

**Тема:** «Разработка геодинамической модели взаимодействия поверхностных и глубинных структур литосферы Тянь-Шаня по данным комплексных геофизических наблюдений»

**Исполнитель:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г.Бишкеке (НС РАН)

**Ключевые слова:** геофизические исследования, литосфера Тянь-Шаня, геодинамическая модель

## **1. Цель проекта**

*1.1. Формулировка задачи / проблемы, на решение которой направлен реализованный проект*

Основной научной проблемой, на решение которой направлен проект, является изучение глубинных причин и особенностей современного континентального горообразования и связанных с ними опасных природных процессов на примере Тяньшанского региона. Данная проблема будет решаться в проекте на основе исследования глубинного строения и современной геодинамики литосферы Тянь-Шаня по результатам геофизических наблюдений в регионе.

*1.2. Формулировка цели реализованного проекта, места и роли результатов проекта в решении задачи / проблемы, сформулированной в п.1.1.*

Основной целью проводимых исследований является разработка схематизированной геодинамической модели литосферы Тянь-Шаня на базе материалов комплексных геофизических исследований, полученных в регионе.

Результаты выполненного проекта помогут выявить характеристики структуры и процессов в нижней коре и верхней мантии Тяньшанского региона и объяснить их взаимодействие с верхнекоровыми структурами. Выполнение заявленных исследований обеспечит реальное привлечение студентов к научно-исследовательской деятельности, закрепление в сфере науки и образования научных и научно-педагогических кадров, формирование эффективных и жизнеспособных научных коллективов в области геофизики на постсоветском пространстве Центральной Азии.

## **2. Основные результаты проекта**

*2.1. Краткое описание основных полученных результатов*

Проведен краткий обзор и анализ существующих вычислительных методов и алгоритмов в геофизике, а также численных методов решения этих задач. Работа является подготовительной для дальнейших исследований в области разработки вычислительных методов и алгоритмов решения прямых и обратных задач в геофизике и, в частности, в геодинамике, а также для привлечения студентов к исследованиям в этой области.

Осуществлен выбор эффективных вычислительных методов и алгоритмов для построения численных геолого-геофизических моделей Тяньшанского региона.

Такой выбор, например, сделан в рамках численной реализации трехмерной математической модели, описывающей процессы крупномасштабной циркуляции в глубоких водоемах на примере озера Иссык-Куль Тяньшанского региона.

Общепринятый метод вычисления скорости течения в задачах циркуляции жидкости в водоемах использует представление вектора горизонтальной скорости в виде суммы баротропной (проинтегрированной по глубине водоема) и бароклинной (отклонения от средней) составляющих (Марчук Г.И.). Разработана новая разностная схема для вычисления баротропных компонент вектора горизонтальной скорости в стационарном случае. Предлагаемая методика позволяет вычислять баротропные компоненты вектора скорости, не опираясь на традиционную процедуру численного дифференцирования функции тока, и не требует постановки дополнительных краевых условий. Разностная схема позволяет описывать пограничные и внутренние переходные слои в решениях, она получена при помощи проекционного варианта интегро-интерполяционного метода. С целью сравнения предложенного метода и метода, использующего процедуру дифференцирования функции тока, проведены тестовые расчеты для модели Стоммела (бассейн прямоугольной формы, составляющие напряжения ветра и закон трения о дно выбраны в специальном виде). Результаты расчетов продемонстрировали неоспоримое преимущество нового подхода.

Многомерная интерполяция – один из важнейших инструментов математического моделирования. В настоящем проекте такая интерполяция используется для построения рельефа дна озера Иссык-Куль и рельефа горной местности Тяньшанского региона, а также для вычисления интегралов в процессе построения разностных схем. Исследован статистический метод интерполяции, широко используемый в геофизике: крайгинг. При помощи серии численных экспериментов для модельных поверхностей осуществлен выбор оптимальных значений параметров процедуры крайгинга.

Подготовлены материалы полевых магнитотеллурических наблюдений для численного моделирования.

Для измерений компонент магнитотеллурического поля на профиле «ALAI-TIPAGE» использовались широкодиапазонные станции GIPP (1000 Гц - 1000 с) с индукционными датчиками магнитного поля и длиннопериодные станции LEMI-004 (периоды до 10000 с) с феррозондовыми магнитометрами.

Для обработки данных, полученных станциями GIPP, использовался стандартный пакет программ обработки EMERALD, разработанный специалистами Центра Наук о Земле (г. Потсдам). Программа обработки основана на расчете функции взаимной корреляции всех компонент поля. Далее проводится Фурье-преобразование, в результате чего формируются спектры мощности в широком частотном диапазоне, которые затем пересчитываются в компоненты тензора импеданса. Полученные компоненты тензора импеданса и геомагнитного типпера составили входной набор исходных данных для дальнейшего численного моделирования (решения обратной задачи).

Построены предварительные геофизические модели Тяньшанского региона по профилю «ALAI-TIPAGE».

Построение численных геоэлектрических моделей по профилю «ALAI-TIPAGE» было выполнено с помощью программы Rodi-Mackie, реализующей метод нелинейных сопряженных градиентов. Реализованная в этой программе процедура 2-D инверсии производит совместный подбор наблюдаемых значений импеданса и типпера, при этом осуществляется сглаживание модели сопротивления посредством минимизации следующего функционала:  $(\text{наблюдаемые данные} - \text{вычисленные отклики})^2 + \nabla (\text{оптимизируемая модель} - \text{априорная модель})^2$ . Второй член функционала “штрафует” гладкие отклонения оптимизируемой модели от априорной.

Входной ансамбль инвертируемых данных включал в себя наблюдаемые значения кажущегося сопротивления и фазы импеданса для двух поляризаций электромагнитного поля, а также значения геомагнитного типпера в  $(\text{Re}, \text{Im})$  представлении, заданные в 78 точках на профиле длиной около 170 км для 30 периодов зондирования в интервале от 1000 Гц до 2000 с.

Сеточная аппроксимация модели имеет 228 горизонтальных узлов и 128 слоев с латеральными изменениями по размеру меньшими, чем коэффициент 1.07 между любыми

соседними ячейками, для того, чтобы удовлетворить ограничениям программы 2D инверсии. Большинство слоев предназначены для адекватного представления в модели топографического рельефа, изменения высот которого вдоль линии профиля, составляют около 1.5 км. Такая детальная аппроксимация рельефа необходима для обеспечения подбора данных на высоких частотах (от 100 Гц).

Пределы погрешностей (весовые коэффициенты) инвертируемых данных были установлены следующим образом: модуль кажущегося сопротивления (ТЕ-мода) – 1000%, модуль кажущегося сопротивления (ТМ-мода) – 30%, фаза импеданса (ТЕ-мода) – 5°, фаза импеданса (ТМ-мода) – 5°, типпер (Hz) – 0.1%.

Стартовая модель для 2-D инверсии представляет собой однородную среду 100 Ом-м до глубин 100 км, ниже распределение сопротивления – горизонтально-слоистое. Плотность и геометрия сеточной аппроксимации в процедуре инверсии, а также включение всех ячеек разбиения в оптимизационный подбор, обеспечивают плавность построения геоэлектрических структур и отсутствие ограничений для проверки различных гипотез о глубинном строении региона исследования.

В результате выполненных 300 внутренних итераций в процессе совместной параллельной инверсии всего входного ансамбля данных погрешность подбора по всем компонентам (RMS-невязка) составила от 1.52. до 1.95.

### *2.2. Описание новизны научных результатов.*

Разностная схема для вычисления баротропной составляющей вектора горизонтальной скорости в задаче циркуляции жидкости в водоемах является оригинальной и предложена впервые. Схема естественным образом позволяет учитывать особенности в поведении решения, такие как пограничные и внутренние переходные слои.

### *2.3. Сопоставление с результатами аналогичных работ мирового уровня.*

В работах Вруан К., Климука В.И., Кочергина В.П., Фридриха Г. и многих других для расчета баротропных составляющих скорости течения используются функция тока и процедура численного дифференцирования этой функции. На тестовом примере мы показали, что эта процедура в некоторых ситуациях может генерировать серьезные вычислительные ошибки. В работах Кочергина В.П. была предпринята попытка прямого вычисления интегральных скоростей (потоков), основанная на дифференцировании исходных уравнений. Однако, эта методика требует постановки дополнительных краевых условий и поэтому возможность ее реализация в рамках полной модели, на настоящий момент, требует дополнительного обоснования. Предложенная методика прямого вычисления баротропных составляющих вектора скорости не требует введения дополнительных краевых условий, свободна от ошибок, возникающих при дифференцировании функции тока, и оказывается более точной, чем ранее известные.

## **3. Назначение и область применения результатов проекта**

### *3.1 Описание областей применения полученных результатов*

Результаты проведенных НИР могут быть использованы производственными организациями, осуществляющими комплексные геолого-геофизические исследования.

Научные решения проекта также могут быть распространены в научно-образовательных структурах, занятых в исследованиях физики Земли, геодинамики.

Активное привлечение студентов, аспирантов и молодых ученых в исследовательский процесс на всех этапах решения научных задач проекта способствует более качественной подготовке высококвалифицированных специалистов.

### *3.2 Перспективы практического применения и коммерциализации результатов проекта*

Выполнение проекта будет способствовать частичному решению вопроса подготовки молодых исследовательских кадров в области геофизики для Центрально-Азиатского региона. В настоящее время на постсоветском пространстве Центральной Азии практически утрачены все, некогда сильные позиции системы обучения и подготовки квалифицированных кадров для нужд геофизики.

Коммерциализация полученных результатов проекта не предусматривается.

#### **4. Перспективы развития исследований**

1) Участие научного коллектива в данном проекте ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» способствует созданию новых исследовательских партнерских групп и вовлечению студентов, аспирантов и молодых исследователей в реальный научно-исследовательский процесс, прежде всего, на постсоветском пространстве государств Центральной Азии.

2) Научный коллектив Исполнителя выполнял ряд проектов по близкой тематике, связанной с анализом и интерпретацией результатов глубинных электромагнитных зондирований в Тяньшанском регионе, при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

3) Наибольшую отдачу для развития в России технологий в области осуществляемых в проекте исследований может дать научно-техническое сотрудничество с исследовательскими коллективами, которые представляют сейсмоактивные регионы нашей планеты, в первую очередь, страны СНГ Центрально-Азиатского региона, а также Греция, Китай, Индия, Япония.

#### **5. Опыт закрепления молодых исследователей – участников этапа проекта в области науки, образования и высоких технологий**

Закреплены следующие специалисты:

Мансуров Артур Наильевич 01.11.1989 года рождения принят на работу на должность мнс Исполнителя.

Директор НС РАН,  
руководитель проекта, д.ф.-м.н.



*Рыбин* Рыбин А.К.