

Федеральное агентство научных организаций

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ РАН в г. БИШКЕКЕ**

УДК 550.380+550.837.82+551.242

УТВЕРЖДАЮ

№ госрегистрации 0155-2014-0001

Директор НС РАН в г. Бишкеке,

Инв. № 01/15

д-р физ.-мат. наук

А.К. Рыбин
" 17 " декабря 2015 г.



ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**ИЗУЧЕНИЕ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ТЯНЬ-ШАНЯ И ОКРУЖАЮЩИХ
ОБЛАСТЕЙ ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ВЫЯСНЕНИЯ
ВЗАИМОСВЯЗИ ПЕРЕНОСА ВЕЩЕСТВА-ЭНЕРГИИ В ЗЕМНОЙ КОРЕ И ВЕРХНЕЙ
МАНТИИ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ
СЕЙСМИЧНОСТИ**

(годовой 2015 г.)

Раздел 8 «Науки о Земле»:

Подраздел 70 «Физические поля Земли: природа, взаимодействие. Геодинамика и внутреннее строение Земли»

Руководитель темы
директор НС РАН,
д-р физ.-мат. наук

А.К. Рыбин

А.К. Рыбин

Бишкек 2015

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Исполнители:

Ученый секретарь,
канд. геол.- мин. наук



подпись, дата

Е.А. Баталева
(введение, разделы
1.1, 1.3, 2.2, 3, 4,
заключение)

Вед. науч. сотр. лаборатории
глубинных
магнитотеллурических
исследований (ЛГМИ),
д-р геол.- мин. наук



подпись, дата

В.Ю. Баталев
(все разделы)

И.о. науч. сотр. ЛГМИ,
канд. физ.- мат. наук



подпись, дата

В.Е. Матюков
(раздел 1.1)

Зав. лабораторией комплексных
исследований геодинамических
процессов в геофизических
полях (ЛКИ),
канд. физ.- мат. наук



подпись, дата

В.Д. Брагин
(разделы 2.1, 5)

Науч. сотр. ЛКИ



подпись, дата

В.А. Мухамадеева
(разделы 2.1, 5)

Мл. науч. сотр. ЛКИ



подпись, дата

Е.В. Воронцова
(разделы 2.1, 5)

Мл. науч. сотр. ЛГМИ



подпись, дата

А.Н. Мансуров
(раздел 1.2)

РЕФЕРАТ

Отчет содержит 117 страниц, 60 рисунков, 2 таблицы и список использованных источников, включающий 41 наименование.

ИЗУЧЕНИЕ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ТЯНЬ-ШАНЯ И ОКРУЖАЮЩИХ ОБЛАСТЕЙ ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ВЫЯСНЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ ПЕРЕНОСА ВЕЩЕСТВА-ЭНЕРГИИ В ЗЕМНОЙ КОРЕ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ СЕЙСМИЧНОСТИ

Перечень ключевых слов: комплексная геолого-геофизическая модель, геоэлектрические модели литосферы, Тянь-Шань, электропроводность, сейсмический режим, мониторинг, активные разломные зоны, деформация, лунно-суточные приливы, сейсмoeлектрические и электросейсмические эффекты, алгоритмы распознавания образов.

Объектом исследования является глубинное строение внутриконтинентального орогена Тянь-Шаня. Особое внимание обращается на строение межгорных впадин.

Цель работы – определение глубинной структуры Тянь-Шаня и сопредельных территорий на предмет взаимосвязи с глубинными геодинамическими процессами и сейсмическим режимом, создание комплексной геолого-геофизической модели исследуемой территории.

Методы и методология проведения работы. В основу работ положены результаты комплексных геофизических исследований: электромагнитных, выполненных с помощью метода магнитотеллурического зондирования (МТЗ) (в трех модификациях – глубинной (ГМТЗ), стандартной (МТЗ) и магнитовариационного зондирования (МВЗ)) с различными типами аппаратуры, и метода зондирования становлением поля, что позволяет получить дополнительную информацию о литологии, физических и реологических свойствах пород, их флюидонасыщенности и т.д., в натурных условиях горного Тянь-Шаня; сейсмических - для верификации построенных геоэлектрических моделей; сейсмологических с целью исследования взаимосвязи распределения неоднородностей в литосфере и сейсмического режима. В отчете также рассматривались результаты сейсмотомографических построений, выполненных разными авторами и основанных на использовании различных баз данных для восточной части Иссык-Кульской впадины. Магнитотеллурические данные, полученные с помощью станций «Phoenix-MTU-5» обрабатывались (в режимах “local” и “remote reference”) стандартной для этой аппаратуры программой SSMT2000, реализующей современные алгоритмы спектрального анализа. Используемая программа обработки основана на расчете функции взаимной корреляции всех компонент поля, а также дальнейшем Фурье-преобразовании, в результате чего в широком частотном диапазоне формируются спектры

мощности, которые затем пересчитываются в компоненты тензора импеданса. Для подавления индустриальных помех и сглаживания передаточных функций в низкочастотном диапазоне дополнительно использовалась программа CORRECTOR, разработанная сотрудниками геофизической компании “Северо-Запад”, г. Москва.

Для анализа динамики электромагнитных параметров в широком частотном диапазоне по данным непрерывных измерений с помощью МТ-станций “Phoenix MTU-5” в Северо-Тяньшаньской сейсмоактивной зоне проводится электромагнитный мониторинг. Для обработки данных магнитотеллурического мониторинга разработана и внедрена методика азимутального мониторинга, позволяющая не только выделить аномальные изменения кажущегося сопротивления и фазы импеданса, но и определить направления, соответствующие их максимальным положительным и отрицательным вариациям (оси сжатия и растяжения). Кроме того, на шести станциях выполняется электромагнитный мониторинг с помощью метода зондирования становлением поля. Таким образом, в отчете представлены результаты электромагнитного мониторинга, полученные как пассивными, так и активными методами электроразведки.

Основные результаты работы. С целью построения комплексной геолого-геофизической модели Тянь-Шаня, были проанализированы геоэлектрические разрезы, полученные в результате решения прямой трехмерной задачи для Иссык-Кульской впадины и обратной 2D инверсии Барскаунского профиля (Южный борт Иссык-Кульской впадины). В результате интерпретации магнитотеллурических данных была выявлена структура, которая расположена в интервале глубин 0-45 км, пространственно приуроченная к Предтерсейскому разлому, а также определена пространственная неоднородность этой геоэлектрической структуры вдоль меридионального простирания.

При сопоставлении результатов интерпретации магнитотеллурических данных (2D-инверсия) и сейсмотомографических построений, выполненных разными авторами с различными базами данных, проведена верификация геоэлектрических моделей, выполнена оценка природы коровой электропроводности на различных пространственно-масштабных уровнях. Анализ распределения гипоцентров сейсмических событий зоны сочленения Терсейской системы поднятий и Иссык-Кульской котловины (Барскаунский профиль) показал значительную концентрацию очагов землетрясений в зоне высокого сопротивления в южной горной части профиля. Эта сейсмоактивная зона пространственно приурочена к палеозойским гранитоидам. В северной части профиля, напротив, выявлена область пониженной сейсмической активности, отвечающая мощной средне-нижне-коровой проводящей зоне. Такая взаимосвязь распределения сейсмичности и геоэлектрических характеристик разреза находит свое подтверждение в предложенном авторами объяснении

физической природы выявленных проводящих структур, основанном на гипотезах флюидизации и частичного расплава пород земной коры.

Исследовано поведение вариаций электропроводности земной коры в широком диапазоне периодов по данным профильных магнитотеллурических зондирований (МТЗ) на полигоне геофизического мониторинга Кентор. Полевыми экспериментами подтверждена концепция взаимосвязи между напряженно-деформированным состоянием среды и изменением кажущегося электросопротивления посредством перераспределения минерализованных растворов между системами трещин.

Предложен новый подход к представлению результатов корреляционного анализа данных магнитотеллурического мониторинга в системе полярных координат. На корреляционных полярных диаграммах выделены области (кластеры) устойчивой корреляции, которые являются интегральной мерой взаимосвязи вариаций электромагнитных параметров с деформациями дневной поверхности.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что положение кластеров на корреляционных полярных диаграммах связано с геоэлектрической структурой пункта наблюдения и соответствует ориентации основных тектонических элементов в окрестности этого пункта. В результате анализа гравитационных приливных воздействий и магнитотеллурических параметров, установлено, что характер взаимосвязи зависит от геоэлектрической структуры пункта зондирования и отражается в распределении устойчивых кластеров на корреляционных полярных диаграммах. Выявлено, что ориентация основных тектонических нарушений (вблизи пункта зондирования) соответствует положению кластеров на корреляционных полярных диаграммах. Выполнена оценка информативности дополнительных импедансов, на основании чего сделан вывод о необходимости использования данного параметра для оценки тензочувствительности пунктов наблюдения.

Проведенные электромагнитные исследования выявили различия в протекании напряженно-деформационных процессов в разных горизонтах земной коры. При этом на территории Бишкекского геодинамического полигона активизация приповерхностных деформационных полей, как правило, не приводит к землетрясениям, в то время как глубинные деформационные процессы реализуются землетрясениями различной силы. Учитывая этот факт, можно утверждать, что разностная методика изучения вариаций геомагнитного поля, применяемая в настоящее время, может оказаться неэффективной. Причем, как следует из приведенных выкладок, чем ближе располагаются приемные станции (магнитовариационные станции), тем меньше у них чувствительность к глубинным процессам. При увеличении расстояния между приемными станциями сказывается недокомпенсация внешнего поля.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 Создание двумерных и трехмерных геоэлектрических моделей литосферы Тянь-Шаня на основе исследований вариаций естественного электромагнитного поля Земли.....	13
1.1 Построение современной комплексной геолого-геофизической модели строения литосферы Тянь-Шаня на различных пространственно-масштабных уровнях (Барскаун)	13
1.2 Создание трехмерной геоэлектрической модели Иссык-Кульской впадины на основе решения прямой задачи	31
1.3 Проявление активности разломных зон Тянь-Шаня на основе анализа взаимосвязи геоэлектрических характеристик разреза и пространственно-временного распределения сейсмичности	38
Выводы.....	43
2 Исследование временных изменений структурно-физических характеристик и напряженно-деформированного состояния геосреды на основе изучения динамики различных геофизических полей.....	45
2.1 Оценки характеристик напряженно-деформированного состояния геосреды на основе анализа динамики электромагнитных параметров по данным режимных зондирований методом становления поля.....	45
2.2 Многомерные диаграммы корреляций компонент напряженно-деформированного состояния геосреды и электромагнитных параметров (по данным магнитотеллурического мониторинга).....	68
Выводы	79
3 Разработка методического обеспечения системы обработки и анализа материалов непрерывных магнитотеллурических наблюдений	80
3.1 Развитие методики обработки и анализа временных рядов вариаций электромагнитных параметров в широком частотном диапазоне по результатам непрерывных магнитотеллурических наблюдений.....	80
Выводы.....	91
4 Продолжение экспериментального изучения динамики электромагнитных параметров в широком частотном с помощью проведения повторных магнитотеллурических измерений.....	92

4.1	Дополнение базы данных временных рядов вариаций электромагнитных параметров новыми результатами мониторинговых магнитотеллурических наблюдений.....	92
4.2	Оценки корреляционных связей вариаций геофизических полей с параметрами лунно-солнечных приливных деформаций.....	93
	Выводы	99
5	Построение алгоритмического обеспечения системы распознавания образов геолого-геофизических данных	100
5.1	Построение алгоритмического обеспечения системы распознавания образов для комплексного анализа геолого-геофизических данных	100
	Выводы	111
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	112
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	114

ВВЕДЕНИЕ

Данный отчет отражает результаты исследований по теме 70.1: «Изучение глубинного строения Тянь-Шаня и окружающих областей по комплексу геофизических методов для выяснения взаимосвязи переноса вещества-энергии в земной коре и верхней мантии с пространственно-временным распределением сейсмичности», выполненные в рамках научного направления фундаментальных исследований Программы фундаментальных научных исследований РАН 2013-2020 гг. **«70. Физические поля Земли: природа, взаимодействие. Геодинамика и внутреннее строение Земли».**

С целью повышения эффективности интерпретации геолого-геофизических данных, полученных в условиях внутриконтинентального орогена, в настоящем отчете представлены результаты решения как прямой трехмерной задачи магнитотеллурического зондирования на примере Иссык-Кульской впадины, так и обратной задачи, которая использовалась для построения региональной геоэлектрической модели по магнитотеллурическому профилю Барскаун. Необходимо отметить, что исследования глубинной структуры Иссык-Кульской системы межгорных впадин выполнялись как электромагнитными, так и геомагнитными методами. Потребность в комплексной интерпретации наблюдаемых и экспериментальных данных определяет актуальность создания методики комплексного анализа и интерпретации геолого-геофизических данных на региональных и локальных геофизических профилях Центрального Тянь-Шаня. Построение комплексной геолого-геофизической модели глубинного строения земной коры и верхней мантии способствует изучению земной коры и верхней мантии, выяснению причин, условий формирования и закономерностей распределения полезных ископаемых, получению дополнительной геолого-геофизической информации. Эта модель совместно с другими геолого-геофизическими данными позволяет прогнозировать вещественный состав отдельных тектонических зон, давать оценку особенностей их образования и тектонического развития, выделять различные генетические типы структур.

Построение комплексной геофизической модели актуально и для решения чисто прикладных задач: от создания глубинной геолого-геофизической основы строения земной коры до минерагенического прогноза перспективных на поиски новых месторождений регионов. В настоящее время изучение глубинного строения многими исследователями ведется исходя из модели блочно-иерархического строения геосреды, согласно которой литосфера состоит из массивов горных пород различных размеров. Блоки, образующие систему, разделены разломами. Основу комплексной геолого-геофизической модели глубинного строения земной коры и верхней мантии Тянь-Шаня составляет разломно-блоковая модель, построенная в результате моделирования геолого-геофизических данных.

В настоящее время изучение земной коры и верхней мантии Научной станцией РАН производится посредством комплекса следующих геофизических методов: электроразведки методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) на региональных и локальных профилях; магниторазведки и гравиметрии, а также электроразведки методом зондирования становления поля на Бишкекском геодинамическом полигоне. Каждый из геофизических методов характеризует строение земной коры и не обладает единственностью решения обратной задачи. В связи с этим, существенным является информативность каждого геофизического метода в отдельности, и комплекса в целом, обеспечивающего построение наиболее вероятных моделей строения земной коры. Учитывая неоднозначность решения обратной задачи, существенную роль играет априорная информация, в качестве которой используются современные гипотезы о развитии земной коры, а также вся имеющаяся геолого-геофизическая информация по изучению осадочного чехла и фундамента для локальных и региональных профилей МТЗ. Практическая значимость настоящих исследований заключается в разработке методики комплексной интерпретации геолого-геофизических данных при изучении глубинного строения земной коры и верхней мантии и построении комплексной модели Иссык-Кульской впадины.

Магнитотеллурические (МТ) данные позволяют получить информацию о распределении электропроводности всей литосферы и, таким образом, представляют собой один из важнейших источников информации для понимания строения, состава и эволюции литосферы. В данном отчете представлены результаты интерпретации магнитотеллурических и магнитовариационных наблюдений, выполненных вдоль Барскаунского профиля, в сопоставлении с результатами сейсмотомографических построений с целью пополнения комплексной геофизической модели глубинного строения земной коры восточного Тянь-Шаня новыми данными.

Необходимость проведения электромагнитных исследований земной коры обусловлена недостаточной изученностью глубинного строения земной коры, перспектив поиска полезных ископаемых, а также современной геодинамики региона. Исследования были выполнены с использованием новых технологий создания геоэлектрических разрезов на основе использования высокоточных цифровых станций с широким динамическим диапазоном измерений. Получена детальная информация о глубинном строении земной коры и верхней мантии. В ходе проведенных исследований для расчленения земной коры на соответствующие геологические комплексы был опробован ряд новых направлений обработки и интерпретации электромагнитных данных. На основе полученных данных были составлены предварительные геоэлектрические разрезы.

В основу настоящего отчета положен также анализ данных сети геофизического мониторинга, функционирующего на Бишкекском геодинамическом полигоне, который включает в себя сеть стационарных пунктов геофизических наблюдений (электромагнитных, сейсмологических, геодезических и гравиметрических). Анализ электромагнитных данных рассматривается обычно как перспективное направление исследований в целях мониторинга состояния геологической среды и прогноза землетрясений.

Применяемые для мониторинга электромагнитные методы (ЗСД в частности) имеют хорошую чувствительность к изменению электрических свойств горных пород, слагающих разрез, при изменении их напряженного состояния. В 2015 г. режимные работы методом ЗСД проводились в пунктах стационарных наблюдений: Аксу, Шавай, Чон-Курчак, Таш-Башат, Иссык-Ата, Кегеты и в 14 рядовых пунктах, обслуживаемых передвижной станцией.

Все пункты электромагнитных наблюдений совмещены с пунктами геомагнитных наблюдений. Следует отметить, что метод зондирования становлением поля является одним из самых востребованных электромагнитных методов с контролируемым источником. В комплексе с электромагнитными наблюдениями в этих же пунктах выполняются наблюдения за вариациями геомагнитного поля Земли. В районе полигона наблюдается эффект сейсмического затишья, в связи с чем рядом экспертов предполагается возможность реализации здесь в ближайшем будущем относительно сильного землетрясения.

Одной из задач системы мониторинга является выявление электромагнитных предвестниковых (предсейсмических явлений). Развития таких явлений можно ожидать в рамках модели тесной взаимосвязи сейсмичности с изменениями во флюидном режиме и в характере микротрещиноватости земной коры. Достаточно развитой модели таких явлений, однако, на настоящий момент не существует и случаев регистрации явных предсейсмических эффектов также не много, что затрудняет статистическую обработку и понимание таких процессов.

В настоящем отчете большое внимание уделяется исследованию частотно-временных рядов вариаций всех электромагнитных параметров на основе методики азимутального мониторинга, которая была разработана в ИС РАН для выявления отклика электромагнитных параметров среды на напряженно-деформированное состояние среды. Особое внимание, по-прежнему, уделялось вопросам точности определения магнитотеллурических передаточных функций, получаемых при обработке данных мониторинга. В результате обработки экспериментальных данных МТ-мониторинга, полученных Научной станцией РАН в 2011-2015 гг., было обнаружено большое количество фактов существования вариаций электропроводности с противоположными знаками на ортогональных азимутах, что, с нашей точки зрения, подтверждает гипотезу о перераспределении флюида в поровом пространстве

при изменении напряженно-деформационного состояния среды. Ортогональные направления, по которым наблюдается одновременное увеличение и уменьшение электропроводности, могут быть идентифицированы как направления сжатия и растяжения, соответственно. На основании анализа частотно-временных рядов электромагнитных параметров, регистрируемых при мониторинговых наблюдениях исследован отклик каждой из компонент тензора импеданса и их трансформант на гравитационные воздействия и сейсмические события.

В 2015 г. в Научной станции РАН продолжены режимные исследования пространственно-временного распределения деформационных процессов в земной коре, проявляющихся в вариациях различных геофизических параметров геологической среды и, в частности, ее электрических характеристик, таких как удельное электрическое сопротивление, анизотропия и др. Применяемые для мониторинга электромагнитные методы (ЗСД) имеют достаточную чувствительность к изменению электрических свойств горных пород, слагающих разрез, при изменении их напряженного состояния. Работы проводились в пунктах стационарных наблюдений: Аксу, Шавай, Чон-Курчак, Таш-Башат, Иссык-Ата, Кегеты и в 14 рядовых пунктах, обслуживаемых передвижной станцией. Все пункты электромагнитных наблюдений совмещены с пунктами геомагнитных наблюдений. На стационарных пунктах наблюдения выполняются ежедневно, кроме выходных и праздничных дней. На рядовых пунктах, обслуживаемых автомобильной приемной станцией, наблюдения проводятся с дискретностью 3-5 дней. Оснащенность полигона современными инструментальными средствами, такими как: мощный импульсный источник тока ЭРГУ-600-2 с комплектом цифровых приемных станций для проведения активного электромагнитного мониторинга земной коры; современная телеметрическая широкополосная сейсмологическая сеть, передающая наблюдаемые данные в центр сбора в режиме реального времени; прецизионные протонные магнитовариационные станции, позволяют НС РАН получать качественную информацию о развитии деформационных процессов и связанных с ними изменениями физических характеристик горных пород в различных горизонтах земной коры.

Для выявления некоторых общих закономерностей, отражающихся на временных рядах кажущегося электрического сопротивления на всех пунктах электромагнитного мониторинга и связанных с развитием сейсмического процесса в регионе, был проведен корреляционный анализ вариаций ρ_t , результаты которого предоставлены в настоящем отчете. Как наиболее информативные рассматривались временные ряды электрического сопротивления на стационарных пунктах ЗСД при всех ориентировках приемных диполей.

Одно из перспективных направлений фундаментальных исследований в области наук о Земле - разработка методов и алгоритмов для анализа, моделирования и интерпретации

геолого-геофизической и геодинамической информации, представленной в виде распределенных баз данных. Создание новых математических методов распознавания, кластеризации и оценки проявления аномальности геологических объектов в геофизических полях, разработка на их основе информационных технологий анализа, обработки, создания и визуализации распределенных баз данных и знаний ориентировано на повышение эффективности исследований в фундаментальной сфере наук о Земле. Новые алгоритмы позволяют работать с огромным объемом цифровой информации.

1 Создание двумерных и трехмерных геоэлектрических моделей литосферы Тянь-Шаня на основе исследований вариаций естественного электромагнитного поля Земли

1.1 Построение современной комплексной геолого-геофизической модели строения литосферы Тянь-Шаня на различных пространственно-масштабных уровнях (Барскаун)

В основу комплексной интерпретации наблюдаемых геофизических данных положена взаимосвязь между отдельными физическими характеристиками геологической среды, что позволяет повысить результативность информации, получаемой при интерпретации данных любого отдельного взятого геофизического метода. Именно это обстоятельство служит стимулом к развитию комплексирования методов геофизических наблюдений при решении обратных задач геофизики. Обычно исходят из предположения, что объекты геологической среды со своеобразными геофизическими параметрами должны отличаться и геологическим строением, то есть каждая достоверная геофизическая аномалия должна найти свое объяснение с точки зрения геологии. Понятно, что аномалии в геофизических полях проявляются тем ярче, чем контрастнее физические свойства аномальных объектов и вмещающих пород. При изучении глубинного строения наибольшей разрешающей способностью обладают сейсмические и электроразведочные методы, поэтому построение современной комплексной геолого-геофизической модели строения литосферы любого региона земного шара невозможно без расчета и создания современных геоэлектрических моделей земной коры и верхней мантии. Основой для построения глубинных геоэлектрических моделей в Научной станции РАН служат магнитотеллурические исследования, которые дают возможность изучения электрических свойств коры и мантии, тем самым предоставляют нам новые знания о глубинной структуре и динамике земных недр. Построенные геоэлектрические разрезы позволяют проследить развитие разломных зон по глубине, определить характеристики областей повышенной пористости и флюидонасыщенности (в том числе, частичного плавления). В комплексе с результатами других геофизических методов это дает возможность подойти к пониманию характера тектонических движений, диагностированию флюидного и сейсмического режима, локализации месторождений полезных ископаемых. Учитывая то обстоятельство, что объектом нашего исследования является такой сейсмоактивный район, как Тянь-Шань, где в течение года происходит 500-600 сейсмических событий, особенно актуальным становится изучение строения межгорных впадин, их горного обрамления и разломных структур, представляющих собой зоны сочленения этих геологических объектов. Поэтому в рамках

настоящего отчета рассмотрим круг вопросов, связанных с магнитотеллурическими исследованиями на южном борту Иссык-Кульской впадины.

Практическое применение МТ-метода в условиях горного рельефа Тянь-Шаня осложнено трудностями выбора подходящих площадок для установки измерительной системы, что не позволяет обеспечить равномерное расположение пунктов зондирования вдоль профиля исследования. Особенно сильно это проявилось в региональных МТ-исследованиях Центрального Тянь-Шаня по профилю «Барскаун» (рис.1) на участке южного борта Иссык-Кульской впадины [1, 2]. Региональный профиль «Барскаун» пересекает Тяньшанский ороген в меридиональной полосе вблизи 78 градуса в.д., соответственно, в центральной части профиля имеется 60-км сегмент пересечения акватории озера Иссык-Куль, где отсутствуют МТ-зондирования. Помимо этого, на участке профиля, включающего в себя южный берег и горное обрамление Иссык-Куля, с допустимым качеством было выполнено всего лишь несколько пунктов зондирования. Поэтому для верификации результатов интерпретации МТ-данных по региональному профилю «Барскаун» и детализации геоэлектрического строения южного борта Иссык-Кульской впадины силами Научной станции РАН в последние годы были проведены дополнительные профильные МТ-зондирования в этом районе.

Отметим, что в рамках ранее выполненных региональных профильных МТ-исследований на территории Центрального Тянь-Шаня (включая профиль «Барскаун») были построены блочные 2D геоэлектрические модели, основным элементом которых является слой повышенной проводимости с залеганием кровли на глубинах 20 - 30 км [1,2]. При этом была отмечена близость положения электропроводящего слоя и зоны пониженных сейсмических скоростей - волновода, выявленного в сейсмотомографических исследованиях [3,4]. Однако, более поздние сейсмотомографические построения дают противоречивые оценки глубин слоя с дефицитом скорости сейсмических волн под Иссык-Кульской впадиной: так, например, в работах Т.М. Сабитовой и Н.Х. Багмановой – 25-30 км [5,6], С. Рекер и И. Кулаков дают глубину залегания в 60-70 км [7, 8]. В этой ситуации задача построения геоэлектрической модели земной коры южного борта Иссык-Кульской впадины, с использованием современных возможностей метода МТЗ-МВЗ, и уточнения параметров регионального проводящего слоя является весьма актуальной.

В пределах складчатой области Северного Тянь-Шаня еще с раннепалеозойского времени существуют крупные блоки, слагающие единый Муюнкумо-Наратский срединный массив [9]. В пределах этого массива выделяется Иссык – Кульская блок, расположенная под Иссык-Кульской впадиной и обрамляющими её хребтами Кунгей и Терской Алатау. На севере он граничит с позднекаледонскими структурами Чон-Кеминской складчатой области по

Чилико-Кеминскому разлому, на юге - с раннекаледонскими складчатыми сооружениями Бурханской зоны по Центрально-Терской разлому. Блок сложен в основном докембрийскими и каледонскими гранитоидами, разбит разломами северо-восточного и северо-западного направлений. В краевых его частях сохранились фрагменты покрова нижнепалеозойских отложений, залегающего в виде моноклинально залегающих пластов или простых крупных антиклинальных и синклинальных складок с пологими сводами. Общая мощность нижнепалеозойских пород, перекрывающих цоколь массива, не превышает 3000 м. Толща представлена андезит - дацит – порфиритовой, карбонатно – кремнисто – терригенной и вулканогенно – кремнисто – терригенной формацией. В девоне и карбоне вокруг крупных каледонских разломов образовывались приразломные прогибы, что способствовало заложению крупного прогиба в мезозойское время.

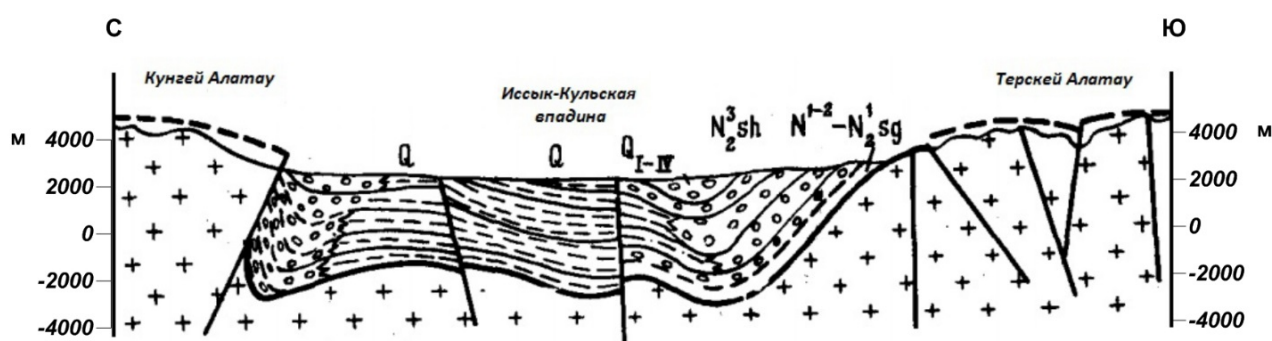


Рисунок 1.1 – Геолого-тектонический разрез через Исык-Кульскую впадину по меридиану градуса $77^{\circ} 55'$ в.д. 1 – домезозойские образования без расчленения, 2 – кайнозойские конгломераты, галечники, 3 – кайнозойские глины, суглинки, 4 – четвертичные отложения, 5 – разломы

В юрское время стартовал процесс осадконакопления в Исык-Кульской впадине. Юрские отложения представлены кварцево-кремнистыми гравелитами и песчаниками с прослоями углей. В период от мела до олигоцена во впадине накапливались мергели в обстановке медленного поднятия. В олигоцене, впоследствии воздействия мощных горообразовательных движений, во впадине начали накапливаться толщи орогенных моласс неоген-четвертичного возраста. В толще отложения Исык-Кульской впадины выделяют киргизскую свиту ($P_3^3-N_1^1$), представленную песчаниками, конгломератами и гравелитами, мощностью до 600 м; исык-кульскую свиту ($N_1^3-N_2^3$), сложенную песчаниками, глинами, мергелями, алевролитами с прослоями солей и гипсов, мощностью до 2500 м; шарпылдагскую свиту ($N_2^3-Q_1^1$), представленную конгломератами и брекчиями, мощностью до 1000 м [10].

Среднечетвертичные отложения в пределах впадины представлены ледниковыми и водно-ледниковыми генетическими типами: моренами необкатанных глыб и обломков, валунниками, перекрытыми лессами. Верхнечетвертичные и современные накопления представлены аллювиальными, пролювиальными, ледниковыми и озерными осадочными толщами. Общая мощность осадочной толщи Иссык-Кульской впадины превышает 5000 м. Границами Иссык-Кульской межгорной впадины являются достаточно хорошо выраженные разломы Предкунгейский на севере и Предтеркейский на юге. Разломы такого типа характеризуются глубоким заложением, уходящим к нижней коре. Однако эти разломы вероятнее всего не достигают верхней мантии, так как содержание мантийного гелия в породах, окружающих разлом, достаточно низкое.

В результате магнитотеллурических исследований Центрального Тянь-Шаня, под складчатым сооружением обнаружен нижнекорový проводник (25-55 км) [1]. На рисунке 1.2 представлена схема проведенных магнитотеллурических зондирований. По профилям региональным профилям была проведена подробная интерпретация, позволившая выделить нижнекорový проводник [1, 3, 11]. Проводящий слой в пределах изученных профилей развит повсеместно, при этом не выдержан по мощности и глубине заложения. Последующие построения региональных разрезов земной коры подтверждают нахождение проводящего слоя в нижней коре ($H=30-50$ км) с сопротивлением 10-20 Ом*м [11]. Интерполяция этих данных позволяет предполагать наличие проводящего слоя под Иссык-Кульской впадиной. Однако конкретное его поведение требует дополнительного исследования.

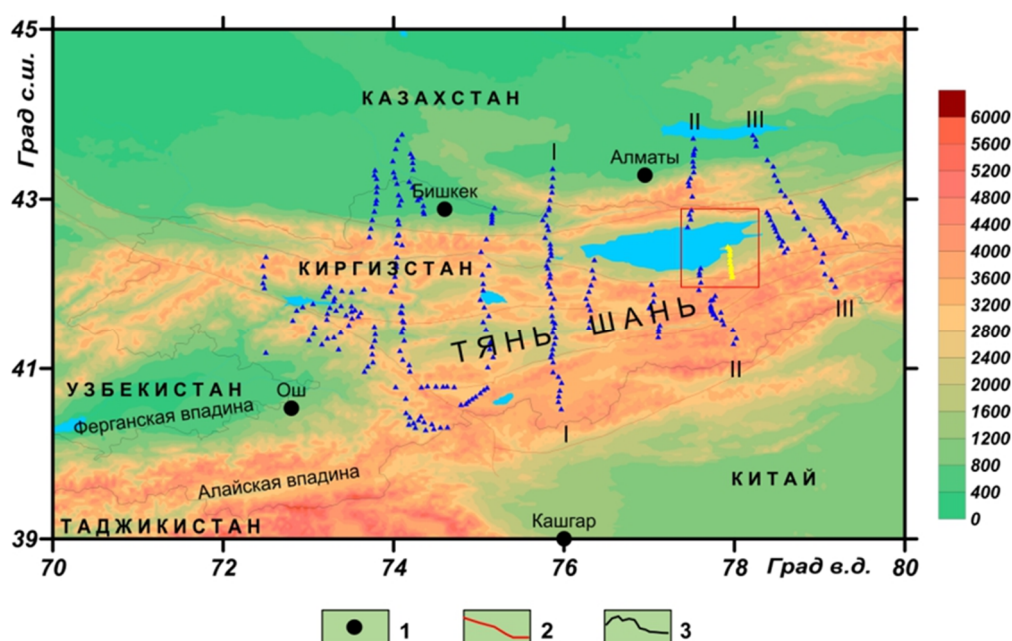


Рисунок 1.2 – Схема проведения магнитотеллурических зондирований Центрального Тянь-Шаня

На картах распределения групповых скоростей поверхностных волн Релея проявляются высокоскоростные зоны, расположенные к северо-востоку и юго-западу от озера Иссык-Куль. Эти зоны отвечают глубинам от 5 до 10 км, и, по-видимому, они отражают наличие высокоскоростных гранитоидных интрузий [12]. Зона повышенных групповых скоростей, расположенная к югу от Иссык-Куля, не находит отражения в повышении скоростей продольных волн в верхней мантии. По сейсмическим данным под Иссык-Кулем наблюдается аномалия понижения скорости р- волны на глубине 75 км [8]. В южном направлении от Иссык-Куля эта аномалия исчезает (см. рис 1.3). Можно предположить, что кровля астеносферного слоя в районе Иссык-Кульской впадины приподнимается, а в районе хребта Терской Алатау погружается на большие глубины.

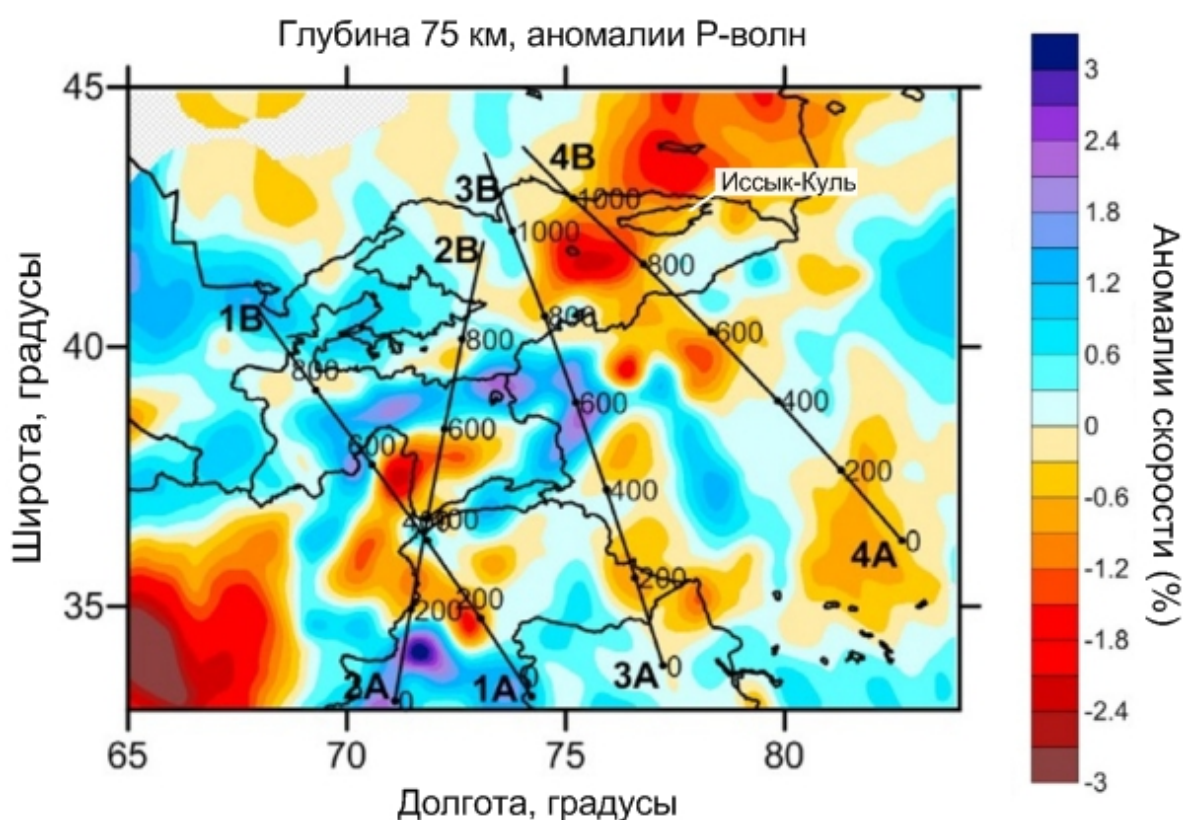


Рисунок 1.3 – Аномалии Р-волн под Средней Азией [8]

Это предположение подтверждают и данные теплового потока [13]. В районе озера Иссык-Куль наблюдается аномалия теплового потока, исчезающая в районе юго-восточного борта впадины. В результате новейшей интерпретации сейсмических данных, обобщённых по всем континентам, установлено, что доля амфиболитов, содержащих наибольший процент связанной воды, достигает максимума на глубинах 20 - 30 км [1]. Затем содержание амфиболита уменьшается, и нижняя часть земной коры представлена породами практически обезвоженной гранулитовой фацией. Это связано с тем, что температура на

глубинах порядка 25-30 км превышает 600 градусов, что приводит к дегидратации амфиболитов. Как правило, дегидратация сопровождается растворением хлоридов, что приводит к появлению плёнок высокой электропроводности. Это способствует появлению аномалий высокой электропроводности на глубинах около 20 км, связанных с насыщением трещиноватых зон высвобожденными водными растворами. Под осадочной впадиной предполагается подобный проводник, исчезающий в районе хребта Терской Алатау, в связи с погружением астеносферного слоя и понижением температур. Методом магнитотеллурических зондирований попробуем подтвердить наличие корового проводника и отследить его поведение.

Магнитотеллурические зондирования по профилю «Саруу». Профильные МТ-зондирования выполнялись на южном берегу озера Иссык-Куль, в ущелье Саруу. Длина профиля около 45 км, шаг по профилю 4 км. Часть пунктов зондирования располагается на полуострове, выдающемся в озеро. На противоположном берегу озера по ущелью реки Чон-Аксу у с. Григорьевка синхронно выполнялись измерения, которые затем использовались в качестве удаленной базы (на рисунке 1.4 они обозначены красным цветом).



Рисунок 1.4 – Карта района работ

Измерения выполнялись с помощью аппаратуры Phoenix MTU-5 [14]. Регистрирующие блоки станций используют 24-х разрядный АЦП и GPS приемники, обеспечивающие синхронизацию по времени с точностью 1 мкс. Диапазон измеряемых вариаций магнитотеллурического поля составляет от 0.0025 до 1600 с. Средняя длительность записи одни сутки. Измерение трех компонент магнитного поля проводилось с помощью штатных индукционных датчиков МТС-50, ориентированных на север, восток и вертикально. Компоненты электрического поля измерялись диполями длиной 50 м, заземленными неполяризующимися электродами с марганцево-угольной крошкой.

Обработка записей проводилась в программе EPI-KIT геофизической компании ООО «Северо-Запад» (г. Москва). В основе программы EPI-KIT лежит математическое вычислительное ядро, основанное на корреляционном методе и робастной статистике. Спектры вычисляются с использованием оконных функций. В расчетах участвуют окна разной формы и длины. В основе блока расчёта спектров находится алгоритм быстрого преобразования Фурье.

Анализ точности каждой из спектральных оценок и отбраковка непригодных значений происходит с помощью двух робастных процедур: “Jack Knife” и итерационные взвешивания с использованием функций Хьюбера и Томпсона. Далее с учетом полученных весов робастно определяются интересующие нас характеристики.

Следует отметить, что при нахождении разных передаточных функций (импеданс, теллурический тензор и т.д.) алгоритм фокусируется на разных типах помех, стремясь в первую очередь ликвидировать наиболее опасные для данной функции. Каждая передаточная функция рассчитывается особым образом [15].

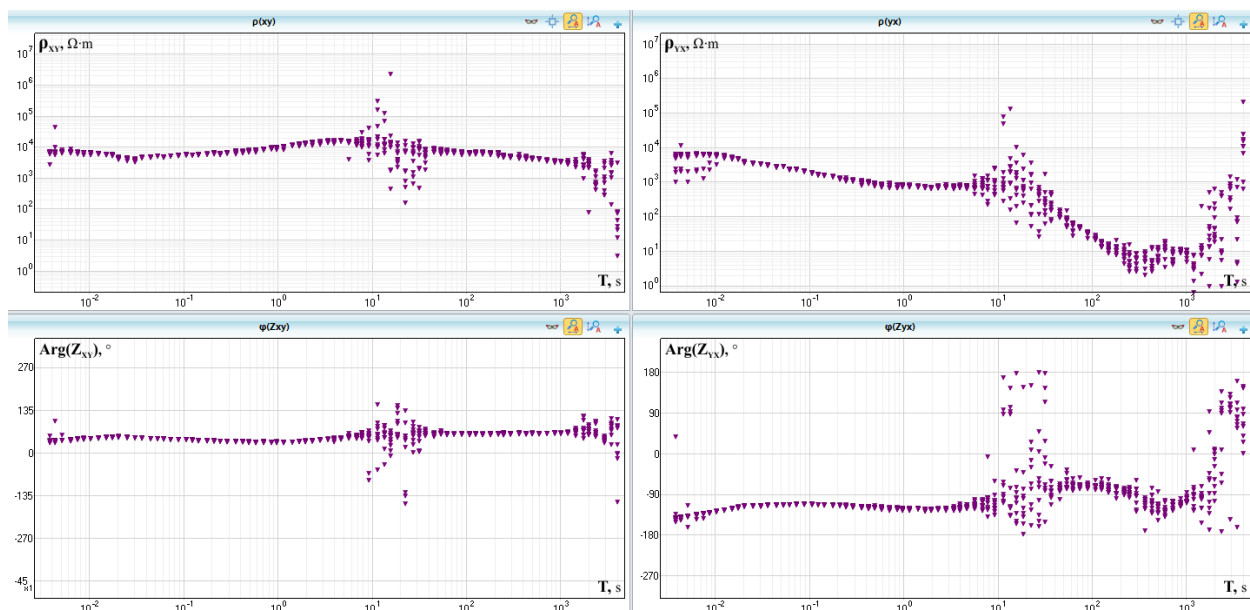
В записях магнитных и электрических каналов двух синхронных записей возможно есть некоррелируемая помеха. Для её подавления используем алгоритм обработки в режиме двухточечных зондирования с удаленной базой [16, 17]. Метод позволяет бороться с помехами, если они не коррелируемы по компонентам разных точек записей. Совместно с робастной статистикой, этот метод дает хорошие результаты [18]. Чтобы определить, в каких каналах актуально применение этого метода, необходимо проанализировать когерентность между спектрами компонент полей. Программа EPI-KIT позволяет выполнить эту процедуру.

Для анализа выберем синхронные записи, с пункта зондирования профиля Саару и с противоположного берега озера Иссык-Куль. Рассчитаем когерентности спектров компонент $Co(H_x^*, H_y^*)$, $Co(H_x^*, E_y^*)$, $Co(E_x^*, H_y^*)$, $Co(E_x^*, E_y^*)$. Значение $Co(E_x^*, E_y^*)$ достаточно велико, больше 0.5, без резких провалов по частоте. Это говорит о либо об отсутствии сильных помех в электрических каналах либо о региональной когерентной помехе. И он влияет на записи обеих станций зондирования. Борьба с таким шумом методом удаленной базы бессмысленна.

Значения $Co(H_x^*, E_y^*), Co(E_x^*, H_y^*)$ близки к единице. Это говорит о том, что отношение сигнал помеха большое, сигналы хорошо коррелируют. Когерентность $Co(H_x^*, H_y^*)$ между магнитными каналами базы и точки резко падает в районе 1-10 герц. Что говорит о наличии некоррелируемой помехи. С которой можно эффективно побороться привлечением в обработку удаленных магнитных каналов.

В качестве удаленной базы используются синхронные записи (профиль Григорьевка) с противоположного берега озера Иссык-Куль (удаление от 50 до 80 км). Рассчитываемые при обработке параметры – компоненты тензора импеданса и типпера. Для дополнительного контроля процесса получения импедансных кривых, записи были так же обработаны в стандартной программе обработки SSMT2000 для аппаратуры фирмы «Phoenix Geophysics». Кривые, полученные в результате работы программы EPI-KIT, не отличаются по форме и уровню от полученных SSMT 2000, однако во всех случаях имеют меньший разброс значений амплитудных и фазовых кривых, точнее отрисовывая форму кривых. На рисунке 1.5 представлены кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса, полученные в результате обработки программы EPI-KIT и SSMT 2000.

А)



Б)

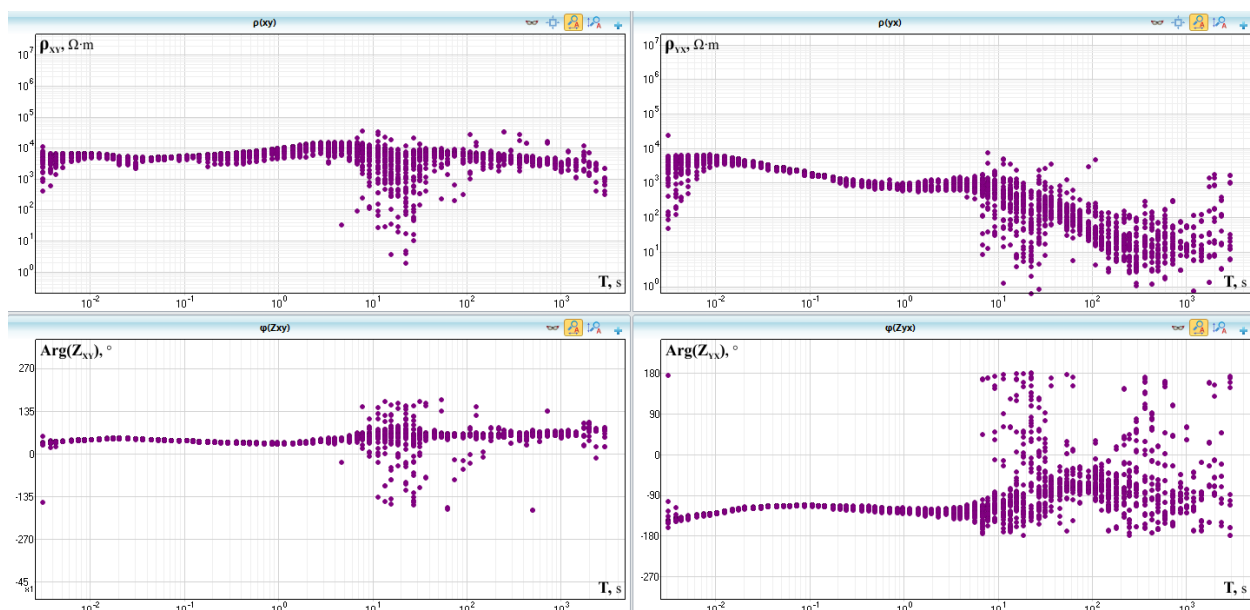


Рисунок 1.5 – Результаты обработки записи МТ данных в программах EPI-KIT(A) и SSMT 2000 (Б)

На втором этапе обработки с помощью программы MT-Corrector, разработанной сотрудниками российской геофизической компании «Северо-Запад» (<http://nw-geo.ru/products/software/mt-corrector/>), было произведено осреднение импедансных кривых (рисунок 1.6). Для получения итоговой средней кривой использовалась сплайн-

аппроксимация. При проведении сплайнов использовался набор полученных оценок из 20 реализаций SSMT-2000 и 10 реализаций EPI-KIT. Компоненты типпера настолько зашумлены, что практически невозможно надежно отрисовать сводную кривую. Поэтому пришлось отказаться от их использования в инверсии. Дополнительные компоненты тензора импеданса также имеют значительный разброс в большинстве случаев. Соответственно, основное внимание было уделено основным компонентам тензора импеданса. Программа MT-Corrector позволяет контролировать дисперсионные соотношения, связывающие модуль (аргумент) и фазу компонент тензора импеданса [19]. Для большинства записей дисперсионные соотношения выполняются, за исключением частотных диапазонов с повышенной зашумленностью записей (диапазон периодов 10-20 с и самые низкие частоты). Такое выполнение дисперсионных соотношений для кривых профиля «Саруу» может свидетельствовать в пользу предположения о квазидвумерности геоэлектрических структур профильного разреза.

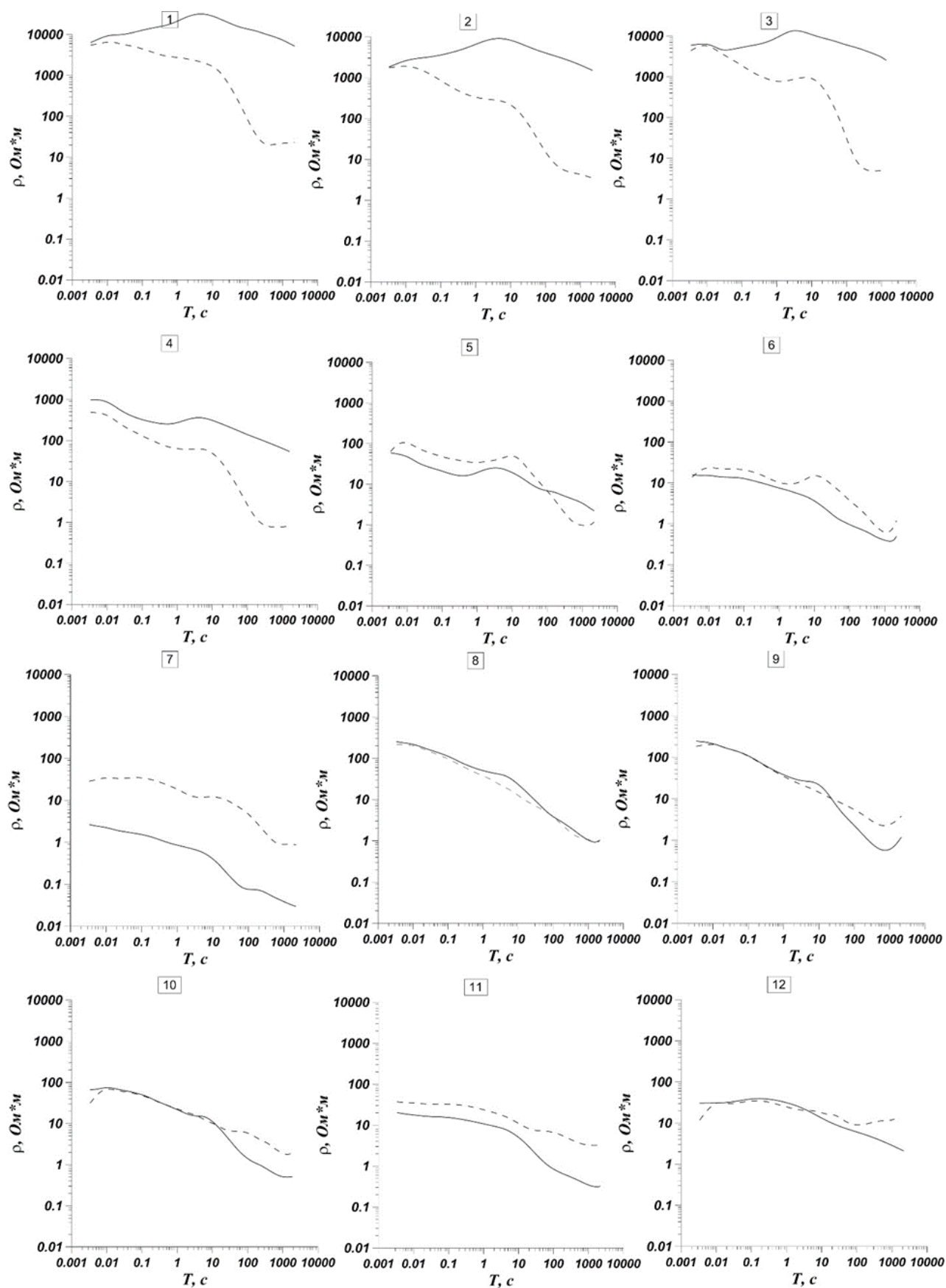


Рисунок 1.6 – Кривые МТ зондирования по профилю Саруу. Сплошная линия – поперечные кривые, пунктирная – продольные

Анализ кривых МТЗ. Для проведения сплайнов использовались все 20 реализаций программы SSMT 2000 и 10 реализаций программы EPI-KIT. Компоненты типпера сильно зашумлены и их практически невозможно отрисовать. Было принято решение не использовать их в инверсии. Дополнительные компоненты тензора импеданса так же сложно различимы в большинстве записей. Поэтому основное внимание уделяется основным компонентам тензора импеданса. Программа MT-Corrector позволяет строить дисперсионное соотношение, связывающие аргумент и фазу компонент тензора импеданса [19]. Для большинства записей дисперсионное соотношение выполняется, за исключением зон повышенной зашумленности записей (большие периоды и диапазон 10 - 20 с). Это говорит в пользу предполагаемой квазидвумерности геоэлектрических структур. Региональные геоэлектрические структуры в Центральном Тянь-Шане имеют субширотное простирание [1], поэтому кривые кажущегося сопротивления ρ_{xy} и ρ_{yx} можно считать продольными и поперечными кривыми в квазидвумерной модели. Поперечные кривые кажущегося сопротивления чувствительны к высокоомным приповерхностным неоднородностям. При попадании пункта зондирования на высокоомную неоднородность кривая статически смещается вверх – наблюдается так называемый р-эффект [19].

На северных пунктах профиля (рисунок 1.7), расположенных в зоне осадочной впадины, продольные и поперечные кривые имеют схожую форму. Они представлены нисходящими ветвями, осложненными локальными минимумами и максимумами, зачастую бьющимися на обеих кривых.

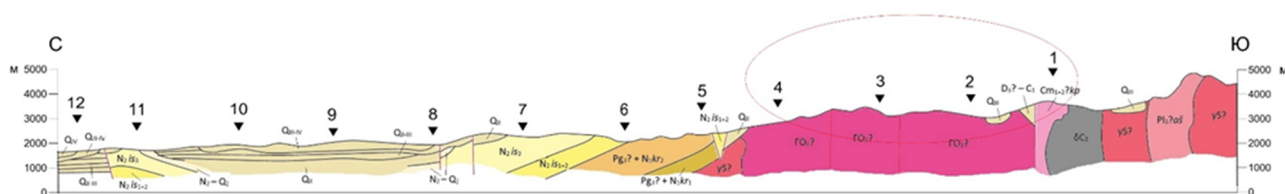


Рисунок 1.7 – Геологический разрез по профилю зондирования

По мере приближения к гранитоидному телу, расположенному в южной части профиля (пункты 1-4), конформность кривых нарушается и на пунктах зондирования, начиная с 4 далее к первому, крутым нисходящим ветвям продольных кривых начинают соответствовать восходящие ветви поперечных кривых. Восхождение высокочастотной ветви поперечных кривых обусловлено уменьшением интегральной проводимости верхнего слоя, расположенной под точкой зондирования. В точке 3 на поперечной кривой заметно боковое влияние осадочной впадины. На продольных кривых выделяется минимум на низких

периодах, отвечающий коровому проводнику. На поперечных кривых наблюдается полное или частичное гальваническое экранирование глубинных проводников.

Анализ векторов Визе-Паркинсона позволяет локализовать зоны проводящих неоднородностей с достаточной надежностью на всех глубинах. На рисунке 8 изображены вещественные вектора Визе для профиля «Саруу» для периодов 1 с, 10 с, 100 с, 1000 с.

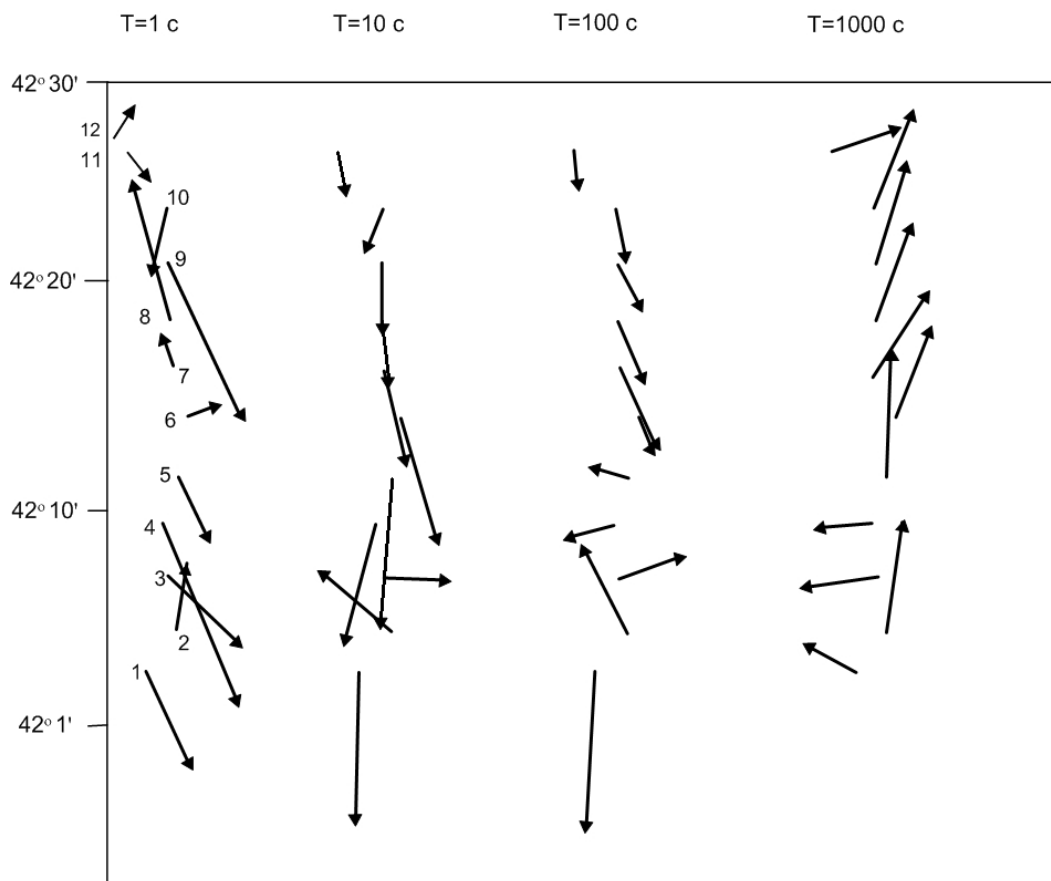


Рисунок 1.8 – Индукционные вектора Визе для точек профиля Саруу

На коротких периодах индукционные стрелки над впадиной хаотично направлены. Это говорит о высоком уровне приповерхностных геоэлектрических неоднородностей. Стрелки в пунктах над горами 1-4 направлены от проводящей впадины на ЮЮВ. С увеличением периода, стрелки в пунктах (5-12), расположенных во впадине, слаженно направлены от проводящего тела, связанного с озером Иссык-Куль и толщей осадков под ним, в Ю-ЮВ направлении. Возможно, кроме приповерхностного проводника, на периодах больше 10 с на поведение стрелок также оказывает влияние средне-коровый проводник, расположенный на глубинах около 10 - 20 км под озером Иссык-Куль. Начиная с периода 100 с наблюдается разворот стрелок против часовой стрелки. На периоде 500 с индукционные стрелки уже ориентированы в С-СВ направлении. На этих периодах влияние проводящего комплекса

впадины практически исчезает, и поведение векторов определяет региональный нижнекорový проводящий слой, выявленный под Центральным Тянь-Шанем [20, 1, 2, 1]. Неоднородность этого слоя (увеличение его проводимости с севера на юг) объясняет направленность стрелок на самых низких частотах в С-СВ направлении.

Построение профильной геоэлектрической модели «Саруу». Построение интерпретационной модели начнем с анализа псевдоразрезов амплитуд кажущегося сопротивления ρ_{xy} , ρ_{yx} и фаз импеданса ϕ_{xy} и ϕ_{yx} (рис.9.). Обычно анализ псевдоразрезов сводится к выделению аномалий в поведении кажущихся сопротивлений и фаз. Положительные аномалии ρ_{xy} , ρ_{yx} и ϕ_{xy} , ϕ_{yx} соответствуют плохо проводящим объектам, а отрицательные - хорошо проводящим. Для неоднородных геоэлектрических сред псевдоразрезы кажущегося сопротивления обычно отражают влияние приповерхностных неоднородностей. Значение сопротивлений из верхней части автоматически переносится на более глубокие, маскируя влияние глубинных слоев. Подобные завышенные значения мы наблюдаем на пунктах наблюдения 1 – 4 южного конца профиля, соответствующего гранитоидным интрузиям.

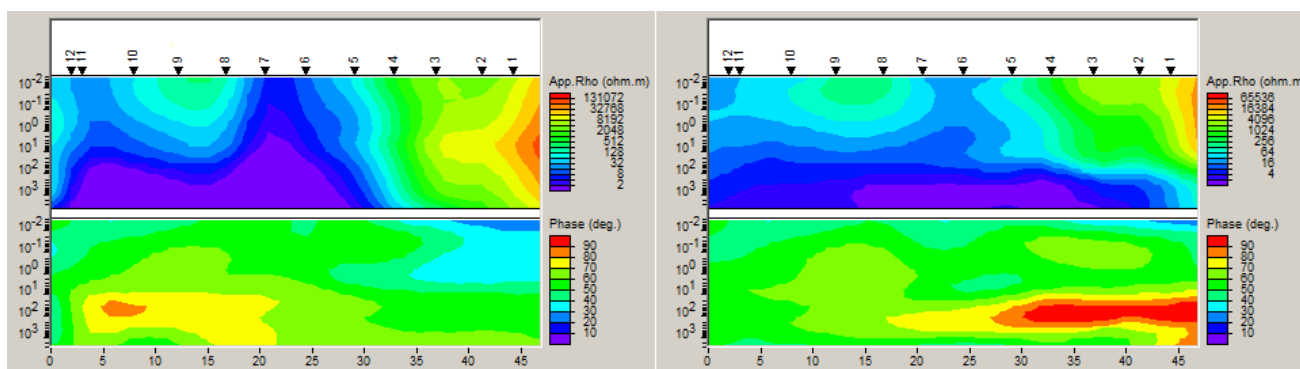


Рисунок 1.9 – Псевдоразрезы МТ данных по профилю Саруу

Один из подходов получения более надежных магнитотеллурических данных для проведения количественной интерпретации состоит в распознавании и нормализации статических искажений кривых кажущегося сопротивления, вызванных приповерхностными неоднородностями. Эти искажения, вызванные приповерхностными неоднородностями, наблюдаются во всем частотном диапазоне зондирования, затрудняя интерпретацию кривых кажущегося сопротивления. Проанализируем наши кривые на предмет наличия ρ - и S-эффектов [19]. Наличие мелких геоэлектрических неоднородностей порождает ρ - эффект. Он проявляется в статическом смещении ветвей кривой начиная с малых периодов. Вариации интегральной проводимости верхнего слоя, подстилаемого высокоомным основанием,

обуславливают появление S-эффекта. Он проявляется в виде смещения низкочастотной части кривой. На рис. 6 показаны кривые кажущегося сопротивления по всем пунктам зондирования профиля. Видно, что кривые на отдельных пунктах (например, 1–3, 4-5) похожи по форме, но смещены по уровню друг относительно друга. Это может говорить о том, что глубинный разрез под соответствующими пунктами практически один и тот же, однако мелкие приповерхностные неоднородности в пункте наблюдения смещают всю кривую по уровню (ρ -эффект). В пунктах 6,7,11 продольная кривая превышает по уровню поперечную, здесь можно предположить, что в данных пунктах присутствуют проводящие малоглубинные объекты и поперечные кривые значительно сильнее продольных затронуты влиянием приповерхностных неоднородностей. Проанализируем природу искажения кривых зондирования. Поперечные кривые сопротивления в точках зондирования 1, 2 и похожи по форме. Для определения периода, за пределами которого кривые конформны, воспользуемся фазовыми кривыми. Поперечные фазовые кривые точек 1, 2 и 3 практически сходятся, начиная с граничного периода 0.2 с (см. рис.10).

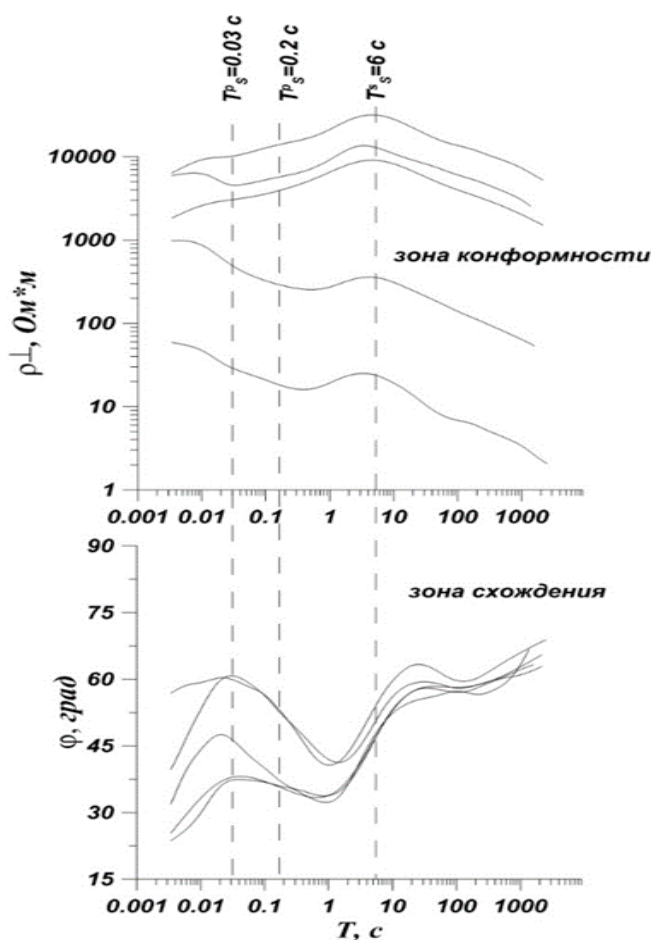


Рисунок 1.10 – Модуль и фаза поперечных кривых для пунктов зондирования 1-5

Величина этого периода невелика, и она относится к восходящей ветви кривой сопротивления. Поэтому статические смещения кривых, проявляющиеся на периодах больше граничного, определим, как р-эффект. По тому же принципу определим граничный период по фазовым кривым для практически конформных поперечных кривых сопротивления на пунктах 4 и 5. Его величина равняется 0.03 с. Эти кривые так же искажены р-эффектом. Обратим внимание на следующий момент: кривые фазы точек 1-5 сходятся на периодах 6 с. Величина периода достаточно велика, на кривых сопротивления эти участки отвечают нисходящим ветвям, вследствие чего можно смело сказать, что эти кривые так же искажены и S-эффектом. Однако без знания о размерах геоэлектрических структур, порождающих эти искажения, о гальванической прозрачности подстилающих верхний слой пород мы не можем хоть сколько-нибудь уверенно избавиться от искажений кривых, вызванных S-эффектом. Однако борьба с р-эффектом не требует стольких знаний о среде, и применив метод усреднения мы получаем кривые, несущие большее количество содержательной геофизической информации. Усреднение проведем по низкочастотной ветви продольных кривых кажущегося сопротивления (см. рис.11) Зеленым пунктиром показаны кривые до смещения, зеленой сплошной – кривые после смещения.

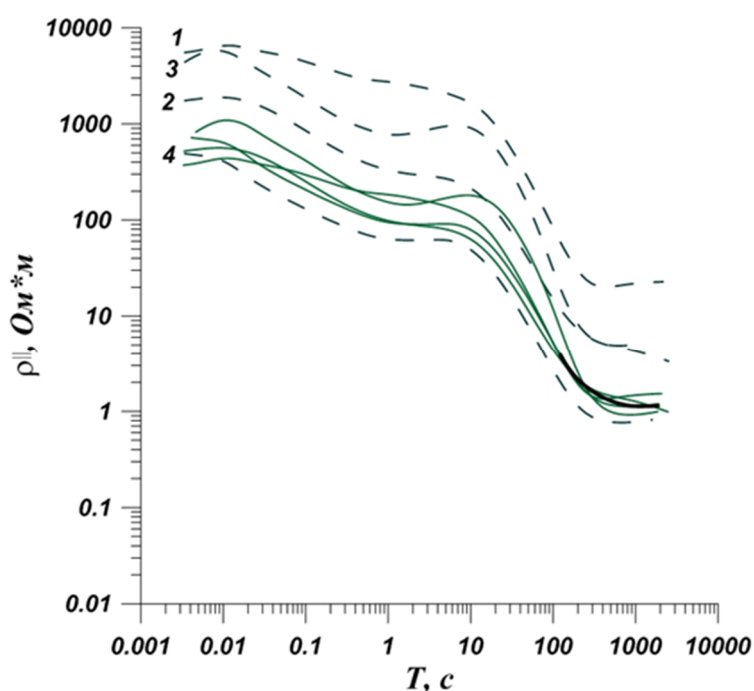


Рисунок 1.11 – Нормализации продольных кривых кажущегося сопротивления (пункты 1-4) путем смещения кривых по уровню к низкочастотную реперу. Низкочастотный репер показан жирной линией. Пунктиром показаны кривые до смещения, сплошной линией – кривые после смещения

Двумерная сглаживающая инверсия МТ данных по профилю «Саруу» была выполнена в программе Rodi-Mackie. Программа реализует метод нелинейных сопряженных градиентов, который пытается минимизировать целевую функцию, которая представляет собой сумму нормализованных невязок данных и сглаженности модели [21]. Компромисс между невязками данных и сглаженностью модели контролируется параметром регуляризации τ . Параметр τ задается вручную пользователем. Входными данными инверсии являются продольные и поперечные кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса по 12 пунктам наблюдения в интервале периодов от 0.01 до 1600 с. При этом четыре продольные кривые, расположенные в горной части профиля (над гранитоидным телом?), статически смещены по принципу, описанному выше (см. рис.11). Сетка аппроксимационной модели состоит из 180 ячеек по горизонтали, разреженных по краям модели и учащенных в окрестностях точек зондирования, и из 97 ячеек по вертикали, увеличивающихся по размерам с глубиной. При построении сетки учитывается рельеф местности. Сопротивление стартовой модели – 100 ом*м. Пределы погрешностей инвертируемых данных следующие: модуль кажущегося сопротивления (ТЕ мода) – 100%, модуль кажущегося сопротивления (ТМ мода) – 10%, фаза импеданса (ТЕ мода) – 5%, фаза импеданса (ТМ мода) – 5%. В результате нескольких тестовых расчетов инверсии было выбрано значение параметра регуляризации τ равное 3. В результате выполнения 240 итераций получена модель, представленная на рисунке 12. Значение RMS-невязки составило 1.84.

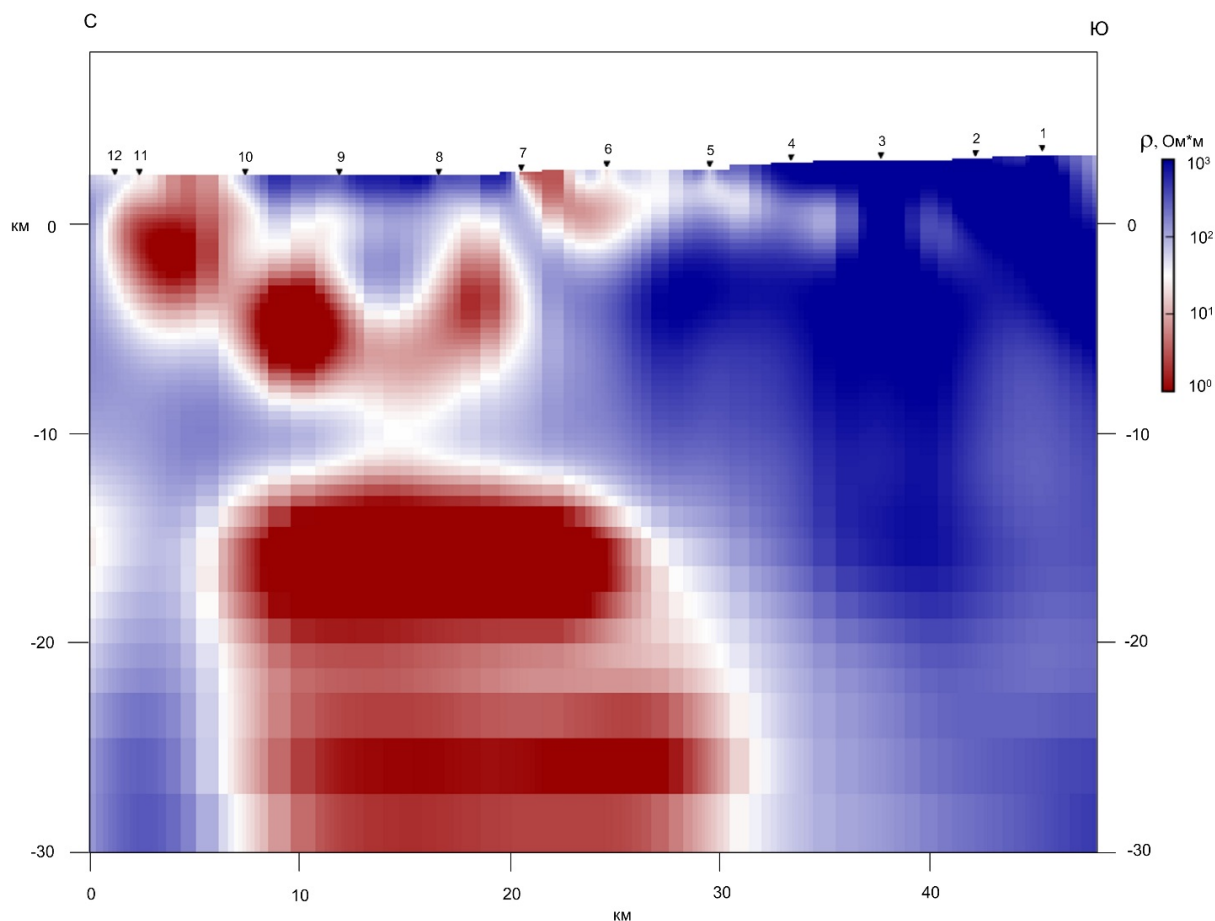


Рисунок 1.12 – Геоэлектрический разрез по профилю «Саруу». Цветовая шкала – десятичный логарифм удельного сопротивления в Ом·м. Треугольниками показано расположение пунктов МТЗ

В северной части профиля (пункты 6-12) в верхней части разреза выделяется зона пониженного сопротивления, расположенная от поверхности до глубины 13 км. По форме аномальная зона напоминает синклинальную складку, с достаточно пологими углами падения. Эта часть профиля отвечает Иссык-Кульской осадочной впадине. На геологическом профиле этому участку соответствует синклинальная складка неоген-палеогенового возраста с неопределенной мощностью накоплений. Однако геоэлектрические данные недостоверны в определении мощности накоплений, из-за искажений кривых индукционными эффектами кажущаяся мощность больше действительной. На крыльях складки недалеко от профиля бурением вскрыт палеозойский фундамент на глубинах около 4 км.

На глубинах от 15 км в северной части профиля отмечается крупная средне- и нижнекоровая аномалия, протягивающаяся на север к озеру Иссык-Куль. В южном направлении зона пониженного сопротивления круто уходит вниз. Этот район соответствует отмеченному по геологическим данным Предтерсейскому разлому, отделяющему осадочную впадину от окружающего её срединного массива. Южная часть профиля отвечает хребту

Терской Алатау, сложенному протерозойскими гранитоидами. В этой части профиля отмечается высокоомная аномальная зона, лишь на больших глубинах 30 км (пункты 3-4) переходящая в низкоомную зону, отмеченную в южной части профиля.

1.2 Создание трехмерной геоэлектрической модели Иссык-Кульской впадины на основе решения прямой задачи

Интерпретация электромагнитных данных сводится к восстановлению строения и свойств среды по наблюдаемым значениям ЭМ-поля. Эта задача относится к классу **обратных задач**, в которых по известному следствию требуется установить причину.

Чтобы решать обратные задачи, необходимо, прежде всего, уметь решать **прямые задачи**, в которых по известной причине требуется установить следствие. Применительно к электроразведке прямая задача сводится к определению ЭМ-поля при заданных строении и свойствах среды, и известных первичных источниках поля.

В данной работе на основе данных о батиметрии озера Иссык-Куль и слоистой модели глубинного строения Иссык-Кульской впадины была составлена блочная модель распределения удельного сопротивления земной коры под Иссык-Кульской впадиной и ее окрестностями. На основе этой модели было проведено математическое моделирование по методу, предложенному Р. Макки в [21] и реализованному им же в программе MT3DFwd. По трехмерной модели сопротивлений программа MT3DFwd рассчитывает для заданных периодов значения амплитуды и фазы вектора напряженности магнитного поля и вектора напряженности электрического поля в точках на поверхности земли – центрах горизонтальной проекции ячеек модели.

Модель распределения удельного сопротивления. Для построения модели была составлена сетка прямоугольных ячеек размером 100 ячеек вдоль оси X (на восток), 64 ячейки вдоль оси Y (на север) и 37 ячеек вдоль оси Z (вглубь). При этом по осям X и Y центральная часть сетки размером 86 ячеек по оси X на 50 ячеек по оси Y состояла из одинаковых в горизонтальной плоскости ячеек размером 2 на 2 км. Размер крайних ячеек (по 7 с каждой стороны) по осям X и Y увеличивался экспоненциально по направлению к краю модели, доходя до 256 км.

По оси Z модель имела 20 слоев до глубины 700 м, толщина которых варьировалась от 10 до 50 метров, что позволило детально описать рельеф дна озера Иссык-Куль (рисунок 1.13), и 17 слоев от глубины 700 м до глубины 690 км, описывающих современное представление распределения сопротивления коры и верхней мантии в области Иссык-Кульской впадины.

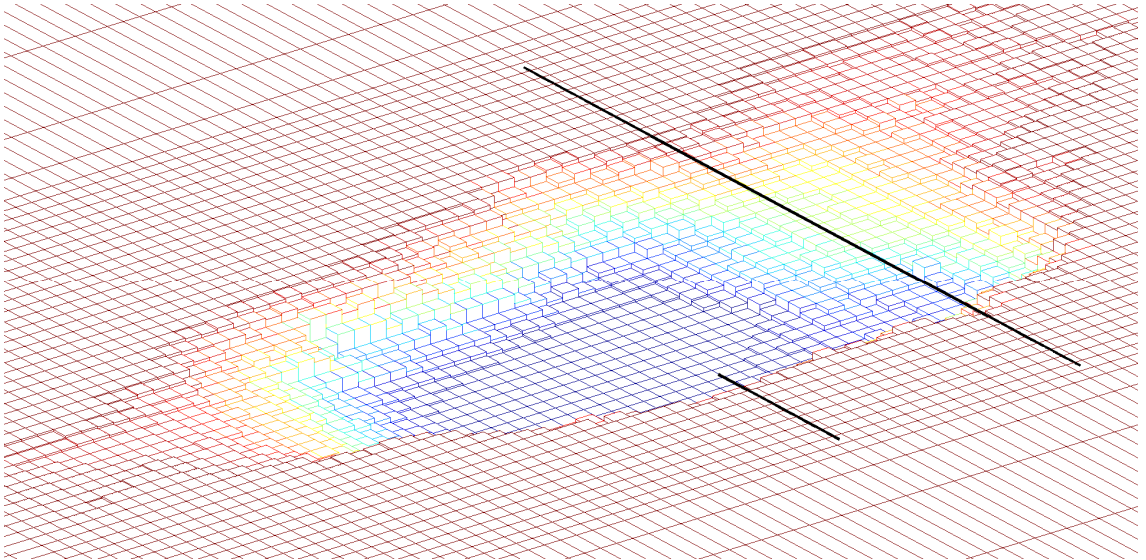


Рисунок 1.13 – Центральная часть модели сопротивлений – Иссык-Кульская впадина.

Граница раздела воды (10 Ом*м) и горной породы (1000 Ом*м)

Значения сопротивлений в верхней части рассматриваемой модели заполнялись на основе данных батиметрии озера Иссык-Куль, при этом сопротивление водной оболочки озера Иссык-Куль было принято равным 10 Ом*м, а сопротивление вмещающей среды – 1000 Ом*м. В нижней части сопротивления земной коры и верхней мантии были заданы на основе распределения сопротивлений полученного ранее геоэлектрического разреза Центрального Тянь-Шаня [1,2].

Краткое описание метода решения прямой задачи МТЗ. Математическая модель прямой задачи основана на уравнениях Максвелла:

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \\ \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\ \text{div} \vec{B} = 0; \\ \text{div} \vec{D} = 0; \end{cases} \quad (1.1)$$

и уравнениях связи:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \vec{B} = \mu \vec{H}. \quad (1.2)$$

Здесь $\vec{E}$ и $\vec{H}$ – векторы напряженности электрического и магнитного полей, $\vec{D}$ и $\vec{B}$ – векторы электрической и магнитной индукции, $\vec{j}$ – вектор плотности тока проводимости, q – плотность электрических зарядов, σ , ε и μ – электромагнитные свойства среды: электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемости.

В рамках геоэлектрической модели поля токами смещения принято пренебрегать, за счет чего производится переход к квазистационарной модели поля. В ее рамках первые два уравнения Максвелла принимают вид:

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E}; \\ \text{rot} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}. \end{cases} \quad (1.3)$$

Переход к интегральной форме и ввод временной зависимости позволяет получить систему:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint \vec{J} \cdot d\vec{S} = \iint \sigma \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (1.4-1)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \iint i\mu\omega \vec{H} \cdot d\vec{S}, \quad (1.4-2)$$

Здесь важно, что электропроводность σ трехмерна, то есть является функцией всех трех декартовых координат x, y, z .

Для численного решения системы уравнений (1.4-1) и (1.4-2) используется метод конечных разностей – самый распространенный на сегодняшний день метод решения трехмерных уравнений Максвелла. Для реализации этого метода исследуемый участок земной коры делится на прямоугольные блоки произвольного размера, при этом считается, что сопротивление в пределах блока постоянно и изотропно. Магнитная проницаемость всюду полагается равной μ_0 .

Далее задаются трехмерные массивы значений вектора напряженности магнитного поля H и вектора напряженности электрического поля E , причем для модели, состоящей из $L \times M \times N$ блоков, эти массивы имеют размер $(L+1) \times (M+1) \times (N+1)$. Привязка компонент элементов этих массивов к принятой блочной структуре земной коры осуществляется способом, показанным на рисунке 1.14: компоненты значения вектора напряженности магнитного поля H задаются как средние на ребрах блоков, а компоненты значения вектора

напряженности электрического поля E и вектора тока проводимости J задаются как средние в центрах граней блоков. Это позволяет задать контуры, описываемые уравнением (1.4-1), вокруг граней блоков по ребрам, а контуры описываемые уравнением (1.4-2), по ломаной, соединяющей центры четырех соседних блоков (правая часть рисунка 1.13).

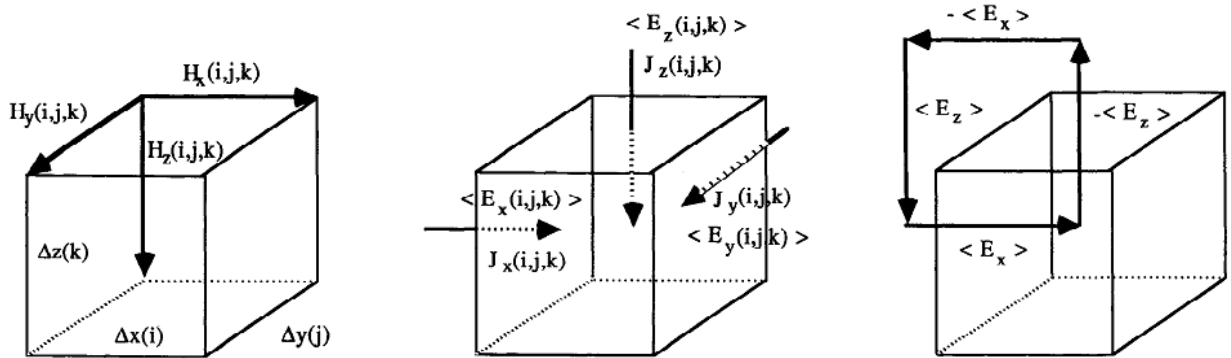


Рисунок 1.14 – Геометрия модели, используемой для решения прямой задачи.

Для упрощения численного решения системы уравнений (1.4-1) и (1.4-2) блоки произвольного размера преобразуются к кубическим блокам с ребром L за счет геометрического сжатия-растяжения. Уравнения (1.4-1) и (1.4-2) инвариантны к такому преобразованию. Такое преобразование затрагивает не только значения напряженности магнитного и электрического полей (H и E), но и значения проводимости σ и магнитной проницаемости μ , делая их анизотропными в модели с блоками единичного размера. Таким образом, в уравнениях (1.4-1) и (1.4-2) σ и μ являются тензорами, в случае геометрического сжатия-растяжения пространства со скалярными или анизотропными σ и μ в новом пространстве σ и μ будут диагональными тензорами.

Формулы преобразования параметров уравнений (1.4-1) и (1.4-2) (параметры в преобразованной модели указаны со штрихом):

$$\Delta x' = \Delta y' = \Delta z' = L$$

$$C_x = \frac{\Delta x}{\Delta x'} \quad C_y = \frac{\Delta y}{\Delta y'} \quad C_z = \frac{\Delta z}{\Delta z'}, \quad (1.5)$$

$$\sigma' = \begin{bmatrix} \sigma \frac{C_y C_z}{C_x} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma \frac{C_x C_z}{C_y} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \frac{C_x C_y}{C_z} \end{bmatrix} \quad \mu' = \begin{bmatrix} \mu \frac{C_y C_z}{C_x} & 0 & 0 \\ 0 & \mu \frac{C_x C_z}{C_y} & 0 \\ 0 & 0 & \mu \frac{C_x C_y}{C_z} \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned} E'_x &= C_x E_x & E'_y &= C_y E_y & E'_z &= C_z E_z \\ H'_x &= C_x H_x & H'_y &= C_y H_y & H'_z &= C_z H_z \\ J'_x &= C_y C_z J_x & J'_y &= C_x C_z J_y & J'_z &= C_x C_y J_z. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Итак, с учетом принятой на рисунке 2 геометрии и вышеописанного геометрического сжатия-растяжения компоненты уравнения (1.4-1) записываются в виде:

$$\begin{aligned} \{[H_z(i, j+1, k) - H_z(i, j, k)] - [H_y(i, j, k+1) - H_y(i, j, k)]\}L &= J_x(i, j, k)L^2, \\ \{[H_x(i, j, k+1) - H_x(i, j, k)] - [H_z(i+1, j, k) - H_z(i, j, k)]\}L &= J_y(i, j, k)L^2, \\ \{[H_y(i+1, j, k) - H_y(i, j, k)] - [H_x(i, j+1, k) - H_x(i, j, k)]\}L &= J_z(i, j, k)L^2. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Значения напряженности электрического поля E рассчитываются как произведения тока через соответствующую грань на среднее значение сопротивлений блоков, разделяемых этой гранью. Компоненты уравнения (1.4-2) записываются в виде:

$$\begin{aligned} \{[E_z(i, j, k) - E_z(i, j-1, k)] - [E_y(i, j, k) - E_y(i, j, k-1)]\}L &= i\omega\langle\mu_{xx}\rangle H_x(i, j, k)L^2, \\ \{[E_x(i, j, k) - E_x(i, j, k-1)] - [E_z(i, j, k) - E_z(i-1, j, k)]\}L &= i\omega\langle\mu_{yy}\rangle H_y(i, j, k)L^2, \\ \{[E_y(i, j, k) - E_y(i-1, j, k)] - [E_x(i, j, k) - E_x(i, j-1, k)]\}L &= i\omega\langle\mu_{zz}\rangle H_z(i, j, k)L^2. \end{aligned} \quad (1.9)$$

где компоненты тензора $\langle\mu\rangle$ вычисляются как средние по соседним ячейкам.

Затем из системы (1.8), (1.9) посредством алгебраических преобразований исключаются параметры E_z и H_z , после чего она решается итерационными методами.

Результат практического моделирования

По результатам работы программы MT3DFwd [22] были получены значения кажущихся сопротивлений R_{xy} , R_{yx} , R_n для каждой из точек профилей, показанных на рисунках 1.13 и 1.14 жирными черными линиями. Затем эти значения были сведены в графики, показанные на рисунках 4-6. На рисунках 3-5 красными точками показана кривая R_{xy} , синими точками – кривая R_{yx} , зеленой линией – кривая R_n .

В точках, удаленных от берега на расстояние 10-15 км, в 20 раз больше глубины водоема (около 650 м), (рисунок 1.15) кривые кажущихся сопротивлений не показывают заметных отклонений от одномерной слоистой модели земной коры и верхней мантии.

В точках, расположенных на берегу, на расстоянии менее 5 км от кромки воды (рисунок 1.15, точки 9 и 10), кривая локально-нормального импеданса сохраняет вид, характерный для одномерной слоистой модели, однако кривые R_{xy} и R_{yx} заметно отклоняются от нее. В данном случае берег вытянут вдоль оси X, и кривая R_{xy} лежит ниже кривой R_n , а кривая R_{yx} – намного выше, причем при приближении к берегу разнос этих кривых увеличивается.

В точках, расположенных на поверхности воды, вблизи берега (рисунок 1.16, точки 11 и 12), кривая локально нормального импеданса на периодах, больших 4^2 ведет себя так же, как и в случае одномерной слоистой модели, а на меньших периодах схожа с линией прямой пропорциональности. При этом кривые R_{xy} и R_{yx} имеют разную форму на малых периодах, но обе лежат заметно ниже кривой R_n .

В точках, расположенных на поверхности воды на расстоянии около 10-15 км от берегов водоема (рисунок 1.17), кривая локально-нормального импеданса на периодах, больших 4^2 ведет себя так же, как и в случае одномерной слоистой модели, а на меньших периодах схожа с линией прямой пропорциональности. При этом на периодах, больших 3^2 кривые R_{xy} и R_{yx} лежат заметно ниже кривой R_n , а на меньших периодах – практически накладываются на нее.

Анализ поведения модельных кривых кажущегося сопротивления указывает на то, что влияние проводящей структуры водной оболочки озера в большей мере проявляется на расстояниях до 5 км от берега озера. На расстояниях от 5 до 13 км это влияние остается хорошо заметным. На расстояниях более 15 км кривые R_{xy} и R_{yx} практически сливаются с кривой R_n .

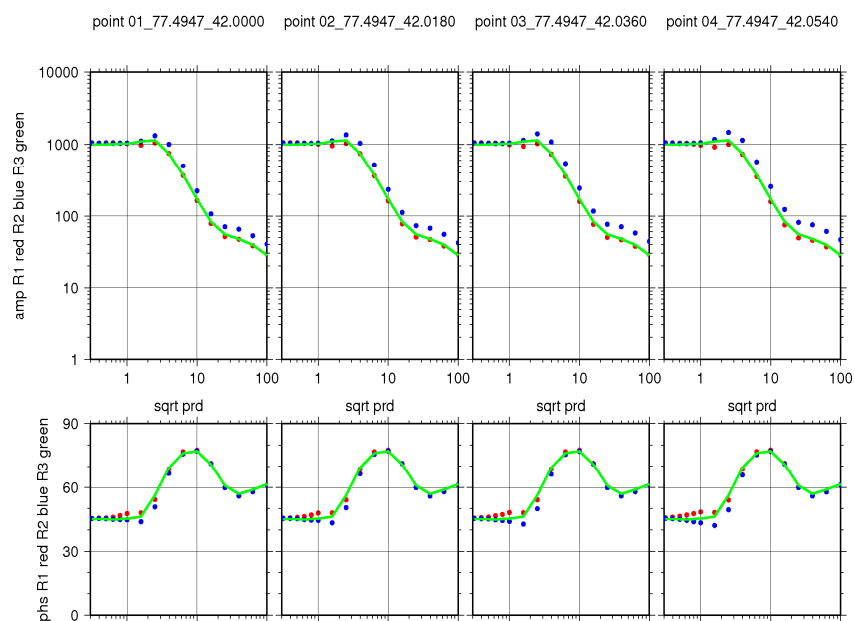


Рисунок 1.15 – Кривые R_{xy} , R_{yx} и R_n для точек суши, удаленных от берега на 15-10 км

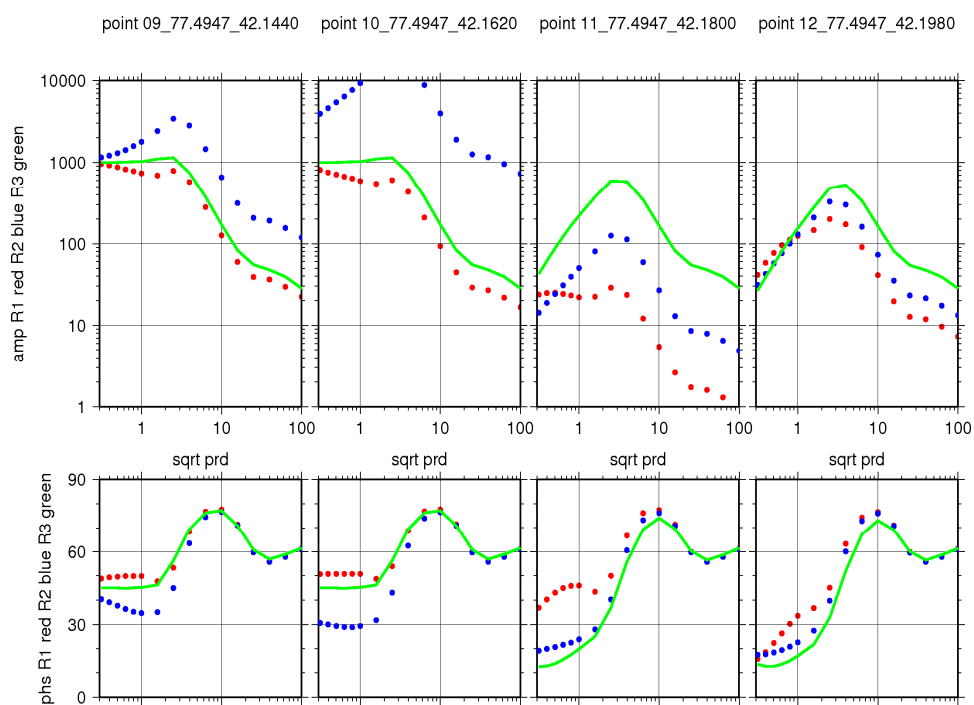


Рисунок 1.16 – Кривые R_{xy} , R_{yx} и R_n вблизи берега озера на суше (слева) и воде (справа)

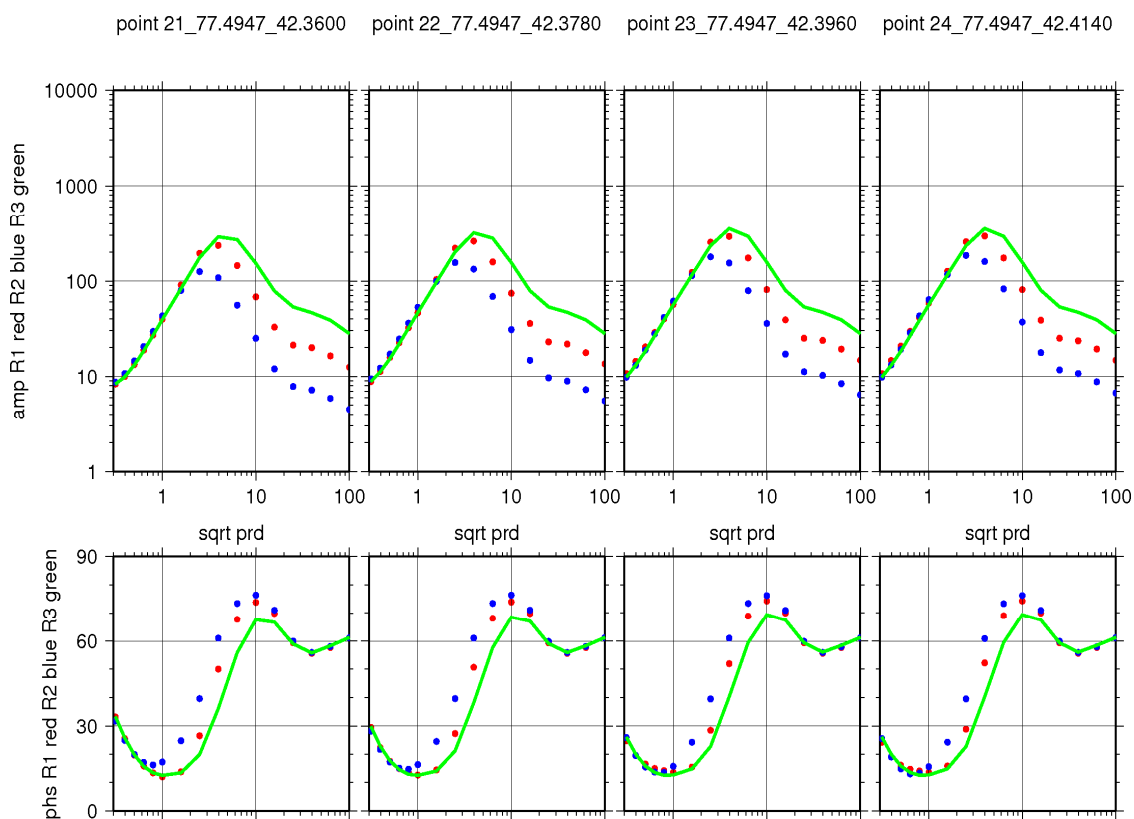


Рисунок 1.17 – Кривые R_{xy} , R_{yx} и R_n на поверхности воды над глубиной около 500 м

Таким образом, на удалении 15 км от береговой линии влияние проводящей структуры Иссык-Куля на кривые зондирования исчезает.

1.3 Отражение глубинной структуры разломных зон в построенных геоэлектрических моделях

Изученность разломных структур Тянь-Шаня явно недостаточна как ввиду сложного строения тектонической структуры исследуемого региона, так и в связи с перекрытием их мощным осадочным чехлом, о чем свидетельствуют разночтения в тектонических построениях. Геодинамические процессы, происходящие в земной коре и верхней мантии внутриконтинентального орогена, неизбежно приводят к появлению многочисленных разломных зон, которые сопровождаются областями повышенной трещиноватости (в научной литературе их часто называют зонами динамического влияния разлома), при этом часть из них являются скрытыми. Однако эти зоны вследствие флюидной минерализации, сульфидизации и графитизации очень ярко проявляются в геоэлектрических моделях, что может быть использовано для установления геологической истории формирования и изучения

геодинамических процессов региона, а также для выявления зон возможного рудопроявления и нефтегазоносных месторождений.

Разломные структуры неизменно привлекают к себе внимание ученых, прежде всего, как наиболее яркие и информативные объекты. В результатах региональных профильных исследований глубинного строения литосферы Центрального Тянь-Шаня с помощью методов МТЗ-МВЗ зоны глубинных разломов, в целом, проявились как геоэлектрические объекты с пониженным сопротивлением [1, 2, 11, 22-24]. Детальные магнитотеллурические и магнитовариационные исследования были проведены для изучения геоэлектрического строения крупнейших разломных зон Тянь-Шаня: Линии Николаева и Таласо-Ферганского разлома. В построенных детальных моделях получены более сложная геометрия и распределение электропроводности проводящих структур, приуроченных к этим разломным зонам [23, 24]. В этих работах установлено, что положение зон глубинных разломов или зон пониженного электросопротивления в геоэлектрических моделях зачастую соответствует границам крупных блоков (проницаемым для флюидов зонам) по геологическим данным. Интересным представляется тот факт, что многие исследуемые проводящие структуры, приуроченные к разломным зонам [23, 24], имеют листрическую форму и их глубина проникновения ограничена коровым проводником, что в совокупности подтверждает представления о тектонической расслоенности Тянь-Шаня.

В настоящем отчете особое внимание будет уделено Предтерсейскому разлому (рисунок 1.18), отделяющему осадочную впадину от окружающего её срединного массива.

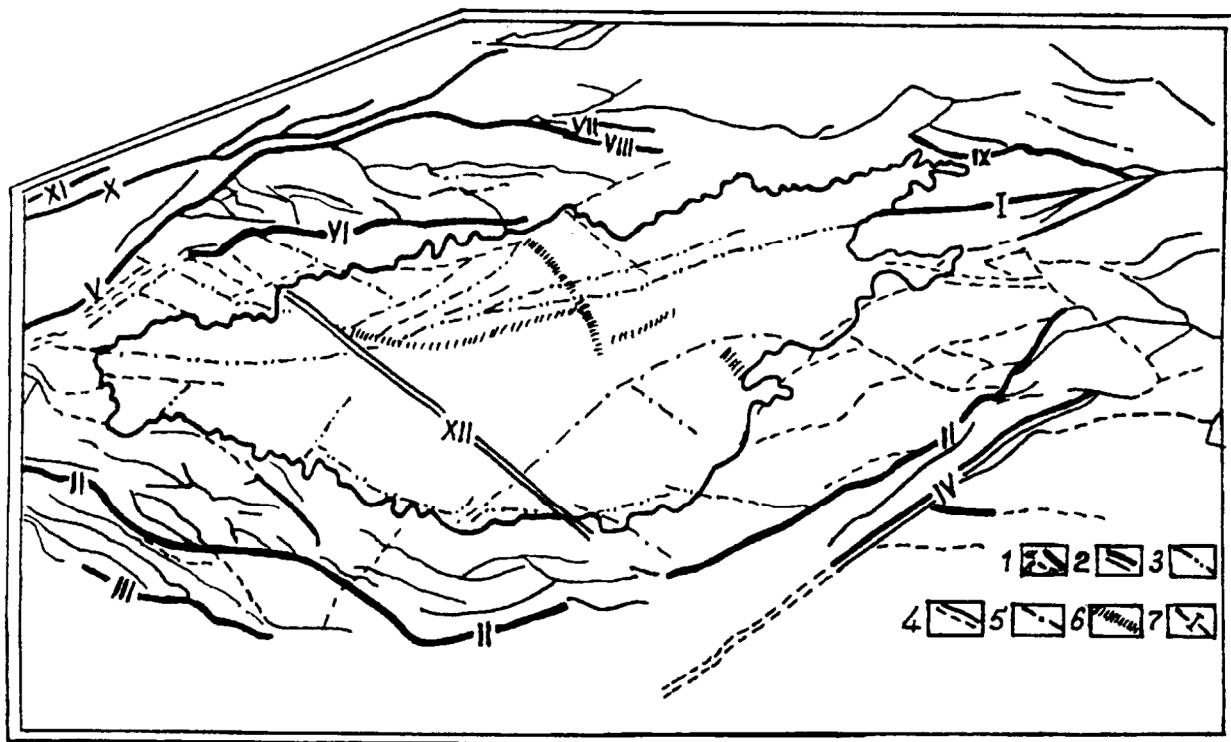


Рисунок 1.18 – Карта разломной тектоники Иссык-Кульской впадины [27] Важнейшие краевые разломы: I – Тасминский; II – Предтерсейский; III – Каракунгейский; IV – Центрально-Терсейский; V – Тогузбулакский; VI – Культорский; VII – Северо-Аксу́йский; VIII – Южно-Аксу́йский; IX – Талдысу́йский; X – Южно-Кеминский; XI – Центрально-Кеминский; XII – Транс-Иссыккульский. 1 – новейшие разломы; 2 – доновейшие разломы; 3 – по геофизическим данным; 4 – по геолого-геоморфологическим данным; 5 – по геофизическим данным; 6 – по магнитометрическим данным; 7 – номера разломов.

Согласно геологическим представлениям, этот разлом имеет дугообразную ориентировку в плане (рис.12), по этому разлому происходит сочленение впадины и хребта по линии длиной около 100 км. Восточная часть разлома была описана И. Садыбакасовым в работе [25], где он обозначил его как Аксу́йский. На участке от р. Ак-Суу до р. Джергалан этот разлом имеет две ветви – северную и южную. Северная ветвь представляет собой три разлома – Керегеташский, Ичкимергенский и Тургенъаксу́йский разлом, плоскость разлома падает от 30°-50° до 75°-80°, поверхность фундамента смещена на 2-3 км в виде взброса. Макаров В.И. назвал этот разлом Южно-Иссык-Кульским [26], отделяющим систему поднятий Терсей Ала-Тоо от Иссык-Кульского межгорного прогиба.

По материалам каталога землетрясений Института сейсмологии Национальной академии наук Киргизской Республики построено распределение сейсмичности вдоль профиля. При построении использовались события, произошедшие с 1977 года по наши дни, отличающиеся

наибольшей надежностью фиксации, по объему пространства на расстоянии 10 км от профиля. На рисунке (см рис. 1.19.) отчетливо вырисовывается неоднородность пространственного распределения сейсмичности в районе профиля.

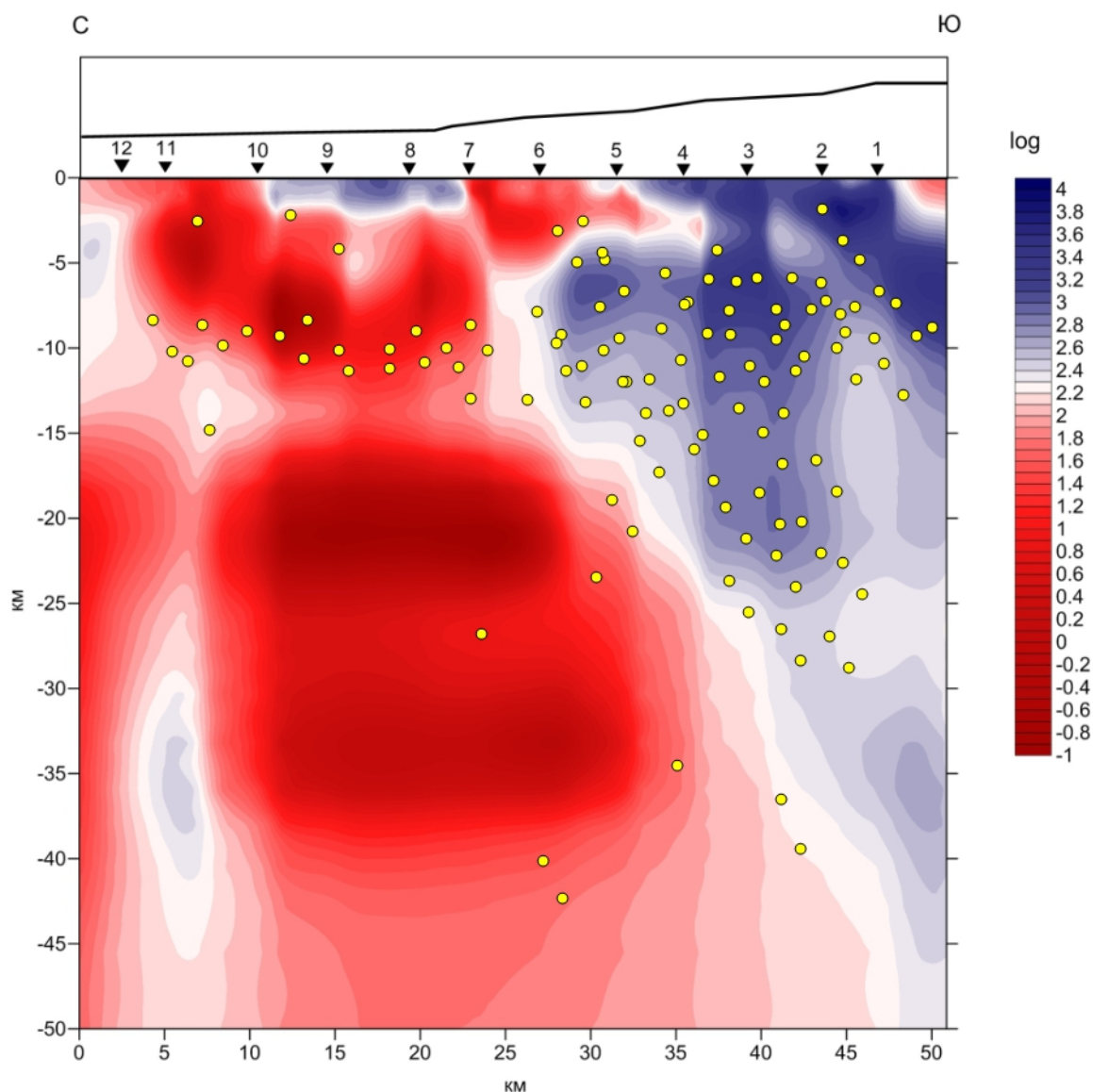


Рисунок 1.19 – Геоэлектрический разрез по профилю «Саруу». Цветовая шкала – десятичный логарифм удельного сопротивления в Ом·м. Треугольниками показано расположение пунктов МТЗ. Желтыми кружками обозначены эпицентры землетрясений по данным Института сейсмологии НАН КР. Граница Мохо залегает на глубине около 55 км.

Значительная концентрация землетрясений проявляется в зоне высокоомной аномалии на юге профиля, пространственно эта сейсмоактивная зона приурочена к протерозойским гранитоидам. Эти породы хрупкие и при оказании на них давления испытывают необратимые изменения, разрушаясь. Поэтому зона гранитных интрузий характеризуется большим числом

не сильных землетрясений, классом K менее 10 единиц. В отличие от гранитоидов Терской хребта осадочные накопления Исык-Кульской впадины – глины, суглинки, супеси, гравелиты, моренные отложения, лессы - подвергаются пластическим деформациям. Поэтому напряжения в породах впадины разряжаются без нарушения их сплошности – в зоне, отвечающей впадине землетрясений практически не зафиксировано. В нижней части, проводящей верхнекоровой аномалии на севере профиля также отмечается зона повышенной концентрации землетрясений. Можно предположить, что это зона тяготеет к тем же гранитным массивам, и откартировать с её помощью истинное положение фундамента осадочной впадины. Вероятно, истинная глубина положения подошвы осадочной толщи составляет около 6-7 км.

Средне-нижнекоровой аномалии на севере профиля отвечает зона пониженной сейсмической активности. Такое асейсмичное состояние среды скорее всего связано с некоторым размягчением пород под воздействием давления и температур. Однако наличие землетрясений на тех же глубинах в южной части профиля говорит об ином состоянии вещества, разной удаленности от расплавленных участков коры, от астеносферного слоя. На сегодняшний день анализ связи параметров сейсмоактивных зон с характеристиками геофизического поля электрических и скоростных неоднородностей для территории Тяньшанского региона был осуществлен целым рядом исследователей, например, [28-30, 25]. Авторами работы [28] показано, что большинство очагов коровых землетрясений Центрального Тянь-Шаня тяготеют к субвертикальным проводящим зонам, имитирующим флюидонасыщенные разломы.

В работе [29] на основе сопоставления глубинных разрезов поля слабой сейсмичности и геоэлектрической структуры приповерхностных разломных зон для территории Бишкекского геодинамического полигона (Чуйская впадина и Киргизский хребет) был сделан вывод о том, что нет веских оснований приурочивать распределение гипоцентров землетрясений к приповерхностным разломным зонам для исследуемой территории.

К интересным выводам пришли авторы работы [30], в которой рассматривалось поле деформаций, глубинное строение земной коры, пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня, и геометрия поверхности корового проводящего слоя, обнаруженного по данным МТЗ под Тянь-Шанем. Было установлено, что наиболее интенсивные горизонтальные деформации земной поверхности соответствуют участкам повышенных градиентов глубины залегания кровли проводящего слоя и совпадают с областями повышенной сейсмичности. При этом показано, что гипоцентры почти всех сейсмических событий были расположены выше слоя повышенной электропроводности (из 7621 землетрясений с $K \geq 6$ лишь 151 произошло в коровом проводящем слое, а 14 ниже него).

Такое распределение гипоцентров связано с хрупкой природой верхней части земной коры по сравнению со средней и нижней ее частями, которые являются более пластичными.

В работе [31] автором выявлено, что положение землетрясений энергетического класса $K > 10$, произошедших на территории Бишкекского геодинамического полигона, может быть объяснено геоэлектрическими особенностями земной коры: наличием высоких градиентов сопротивления, обусловленных высокоомными телами и зонами низких сопротивлений, и присутствием нижнекорового проводящего слоя и проводящего «канала», соединяющего нижние и верхние структуры. Такая геоэлектрическая структура создает благоприятные условия для диффузии флюида из нижнекорового горизонта к земной поверхности.

Остановимся на возможном объяснении физической природы выявленных проводящих структур в геоэлектрическом разрезе профиля «Саруу». По мнению авторов, низкое сопротивление верхнекорового проводника (глубины 7-12 км) связано с существованием трещиноватых, механически ослабленных зон, образовавшихся в результате деформаций хрупкой части разреза и заполненных водными флюидами. При этом высокая проводимость может быть обусловлена повышенной трещиноватостью среды только в том случае, если трещины связаны между собой и заполнены высокопроводящими водными растворами.

Для объяснения природы проводящего объекта, выявленного на глубинах 15-40 км, по-видимому, следует рассматривать гипотезу частичного плавления вещества коры. Такую идею при рассмотрении природы слоев пониженной скорости сейсмических волн и повышенной электропроводности в земной коре Тянь-Шаня уже давно развивает А.Б. Бакиров, например, в работе [32]. При этом предполагается, что эти слои сложены мигмами. Мигма (смесь) – это способный к инъекции или к интрузивному внедрению силикатный расплав, содержащий остаточный недоплавленный материал в рассеянном состоянии, количество которого может варьировать. Образование мигмы обычно связывают с частичным плавлением корового вещества при метаморфизме.

Выводы

Таким образом, с помощью метода МТЗ определено детальное глубинное строение земной коры южного борта Иссык-Кульской впадины.

Построена геоэлектрическая модель по профилю «Саруу». Определены геометрические и электрические характеристики областей пониженного сопротивления в полученном геоэлектрическом разрезе.

При сопоставлении построенного геоэлектрического разреза с распределением сейсмичности вблизи профиля «Саруу» отмечена значительная концентрация очагов

землетрясений в зоне высокого сопротивления в южной горной части профиля. Эта сейсмоактивная зона пространственно приурочена к палеозойским гранитоидам. Напротив, в северной части профиля выявлена область пониженной сейсмической активности, отвечающая мощной средне-нижне-коровой проводящей зоне.

Такая взаимосвязь распределения сейсмичности и геоэлектрических характеристик разреза находит свое подтверждение в предложенном авторами объяснении физической природы выявленных проводящих структур, основанном на гипотезах флюидизации и частичного расплава пород земной коры.

Также представлена синтетическая трехмерная геоэлектрическая модель Иссык-Кульской впадины. При помощи программы MT3DFwd Р. Макки [22] получены кривые кажущихся сопротивлений в точках синтетических профилей на дневной поверхности модели. Проанализировано влияние электропроводности водной массы озера Иссык-Куль на рассчитанные кривые кажущихся сопротивлений.

В результате получена количественная оценка бокового влияния трехмерной проводящей структуры водной оболочки оз. Иссык-Куль на кривые МТЗ для пунктов наблюдений, расположенных на суше в бортовых зонах впадины.

Отметим также, что дальнейшее уточнение геоэлектрических параметров литосферы для территории уникальной Иссык-Кульской впадины следует проводить в рамках решения обратной МТ задачи в 3-D ситуациях с привлечением дополнительной информации, например, данных магнитовариационных и сейсмических наблюдений. Что касается практического приложения разрабатываемых методов комплексной интерпретации геофизических данных, то к настоящему времени на территории Тянь-Шаня выполнены и продолжают выполняться крупные геофизические проекты и эксперименты и обобщения материалов различных геофизических исследований.

2 Исследование временных изменений структурно-физических характеристик и напряженно-деформированного состояния геосреды на основе изучения динамики различных геофизических полей

2.1 Оценки характеристик напряженно-деформированного состояния геосреды на основе анализа динамики электромагнитных параметров по данным режимных зондирований методом становления поля

В 2015 г. продолжены режимные исследования пространственно-временного распределения деформационных процессов в земной коре, проявляющихся в вариациях различных геофизических параметров геологической среды и, в частности, ее электрических характеристик, таких как удельное электрическое сопротивление, анизотропия и др.

Применяемые для мониторинга электромагнитные методы (ЗСД в частности) имеют хорошую чувствительность к изменению электрических свойств горных пород, слагающих разрез, при изменении их напряженного состояния. В 2015 г. режимные работы методом ЗСД проводились в пунктах стационарных наблюдений: Аксу, Шавай, Чон-Курчак, Таш-Башат, Иссык-Ата, Кегеты и в 14 рядовых пунктах, обслуживаемых передвижной станцией. Все пункты электромагнитных наблюдений совмещены с пунктами геомагнитных наблюдений. Следует отметить, что метод зондирования становлением поля является одним из самых востребованных электромагнитных методов с контролируемым источником. В комплексе с электромагнитными наблюдениями в этих же пунктах выполняются наблюдения за вариациями геомагнитного поля Земли.

В таблице 2.1 приведены координаты пунктов, в которых выполняются режимные наблюдения.

Таблица 2.1 – Координаты пунктов режимных электромагнитных наблюдений

Наименование пункта	Широта	Долгота	Тип пункта
Ак-Суу	42,603	74,008	стационар
Шавай	42,617	74,222	стационар
Чон-Курчак	42,626	74,608	стационар
Таш-Башат	42,667	74,770	стационар
Иссык-Ата	42,638	74,960	стационар
Кегеты	42,613	75,157	стационар

Продолжение таблицы 2.1

Ала-Тоо	42,790	74,695	рядовой
Серафимовка н.	42,752	74,837	Рядовой
Дачи	42,778	74,778	рядовой
Скважина 1152 и 11520	42,753	74,655	рядовой
Серафимовка в.	42,712	74,883	рядовой
Тогузбулак	42,672	74,887	рядовой
Норуз	42,720	74,783	рядовой
Кашка-Суу	42,697	74,530	рядовой
Шлагбаум	42,645	74,490	рядовой
Ала-Арча с.	42,580	74,482	рядовой
Ала-Арча в.	42,557	74,488	рядовой
Алмаз	42,660	74,852	рядовой
База	42,662	74,791	рядовой

Использованная в 2015 г. методика наблюдений не отличалась от методики, принятой в 2014 г. Как и прежде наблюдения на стационарных пунктах выполнялись ежедневно, а на рядовых пунктах - с дискретностью 3-5 суток.

Использованное для проведения наблюдений современное оборудование: цифровые приемные электромагнитные станции, современная цифровая сейсмологическая сеть, высокочувствительные прецизионные протонные магнитовариационные станции позволяет ИС РАН получать качественную информацию о развитии деформационных процессов и связанных с ними изменениях физических характеристик горных пород в различных горизонтах земной коры.

В мае-июне 2010 г. произведена замена приемных электромагнитных станций типа КИЦ современными цифровыми измерительными станциями типа ИС-1, которые отличаются от старых станций значительно большим динамическим диапазоном (138 дБ), большей чувствительностью, увеличенной частотой дискретизации входных сигналов (50 Гц у станций КИЦ и 800 Гц – у ИС-1), наличием системы синхронизации с генераторной системой (ЭРГУ-600-2) на базе спутниковой системы GPS. Ранее синхронизация токовой последовательности

в генераторном диполе и сигналами в пунктах наблюдений выполнялась программными методами при первичной обработке зарегистрированных сигналов. При этом точность синхронизации составляла половину дискреты – 10 мсек. Применение для синхронизации встроенных в станцию GPS-приемников позволило увеличить точность синхронизации генераторной и приемных групп до 1 мсек.

Увеличение частоты дискретизации входного сигнала и точности синхронизации позволило выполнить регистрацию процесса становления поля в большом динамическом диапазоне с $\tau \geq 1.25$ мсек.

На рисунке 2.1 представлена схема расположения электромагнитных приемных станций в центральной части Бишкекского геодинимического полигона.

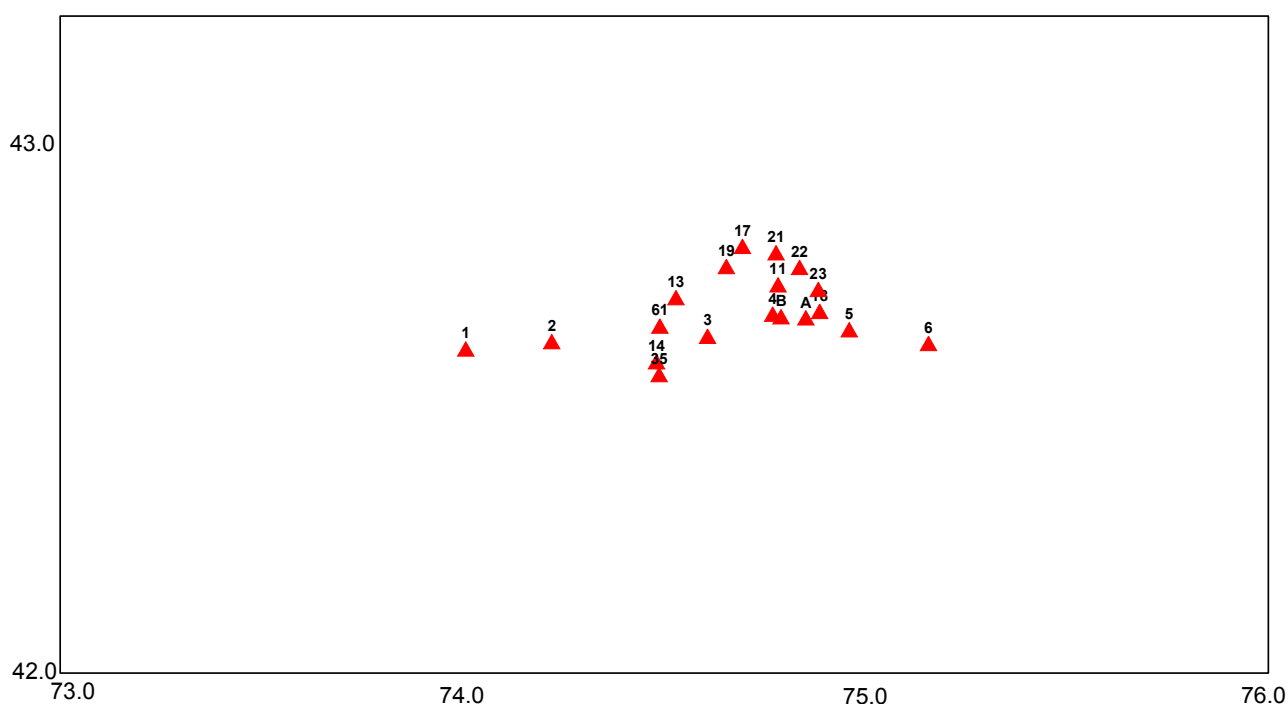


Рисунок 2.1 — Схема расположения электромагнитных приемных пунктов. Стационары: 1- Аксу; 2- Шавай; 3-Чонкурчак; 4-Таш-Башат; 5-Иссык-Ата; 6-Кегеты. Рядовые пункты ЗСД: 11-Норуз; 13- Кашкасу; 14-Ала-Арча ср.; 17-Ала-Тоо; 18-Тогузбулак; 19-Скважины 1152 и 11520; 21-Дачи; 22-Серафимовка ниж.; 23- Серафимовка верх.; 35- Ала-Арча верх.; А- Алмаз; В-База

В течение 2015 года сейсмическая активность продолжала снижаться. На рис. 2.2 показаны графики временного распределения сейсмических событий на территории Бишкекского геодинимического полигона и его окружения.

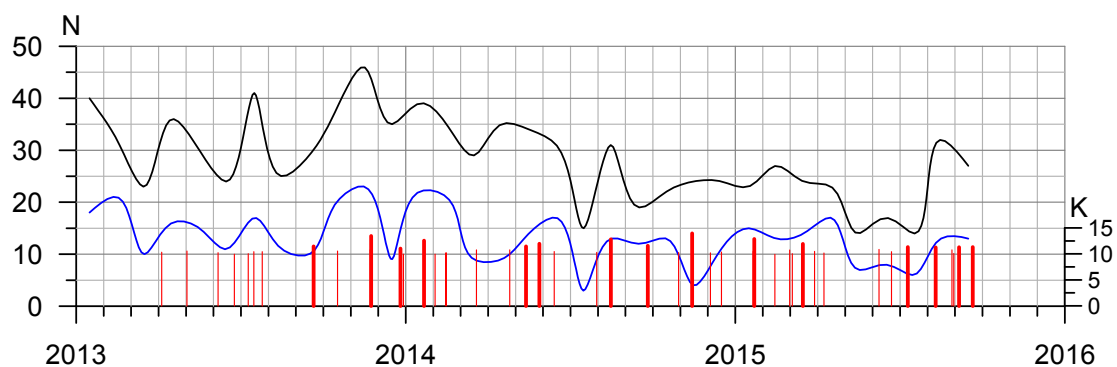


Рисунок 2.2 — Графики среднемесячных значений N (количества событий) для БГП (выделено синим цветом) и для территории, ограниченной координатами: 40° - 44° с.ш. и 70° - 81° в.д. (выделено черным цветом). На нижнюю шкалу координат вынесены сейсмические события с $K \geq 10$

Ранее было установлено, что землетрясения, происходящие на территории Бишкекского геодинамического полигона, как правило, находят отражение во временных рядах удельного электрического сопротивления. На рисунке 2.3 показано сравнение вариаций электрического сопротивления и произошедших сейсмических событий.

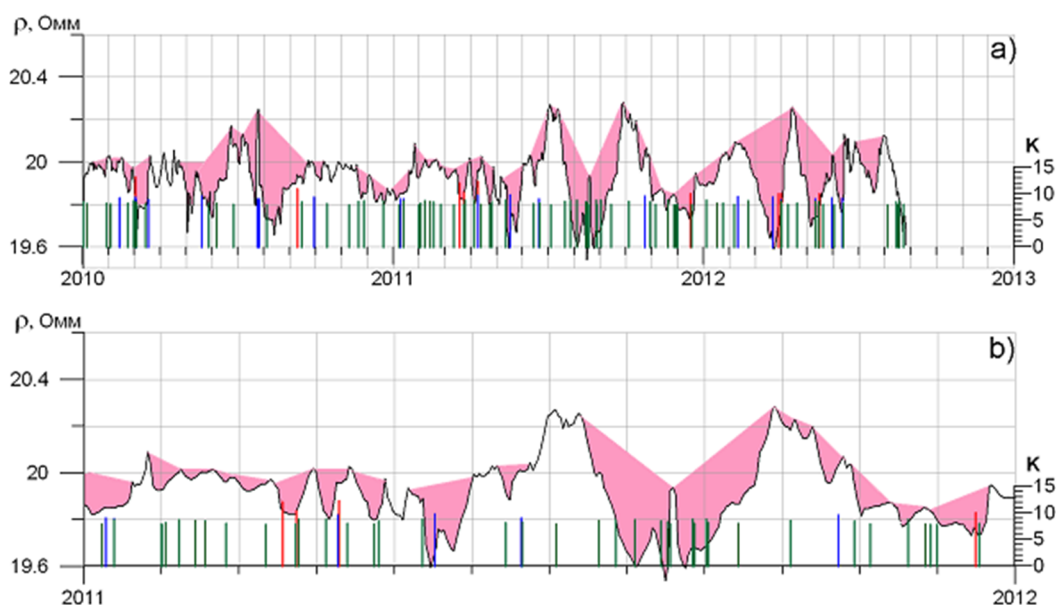


Рисунок 2.3 — Сравнение вариаций электросопротивления (север-юг) и моментов возникновения сейсмических событий с $K > 8$ на территории Бишкекского геодинамического полигона: а) – в период с 2010 г. по сентябрь 2012 г.; б) – в период с января 2011 г. по январь 2012 г.

Рисунок 2.4. демонстрирует динамику распределения сейсмических событий по годам на территории Бишкекского геодинамического полигона и его окружения.

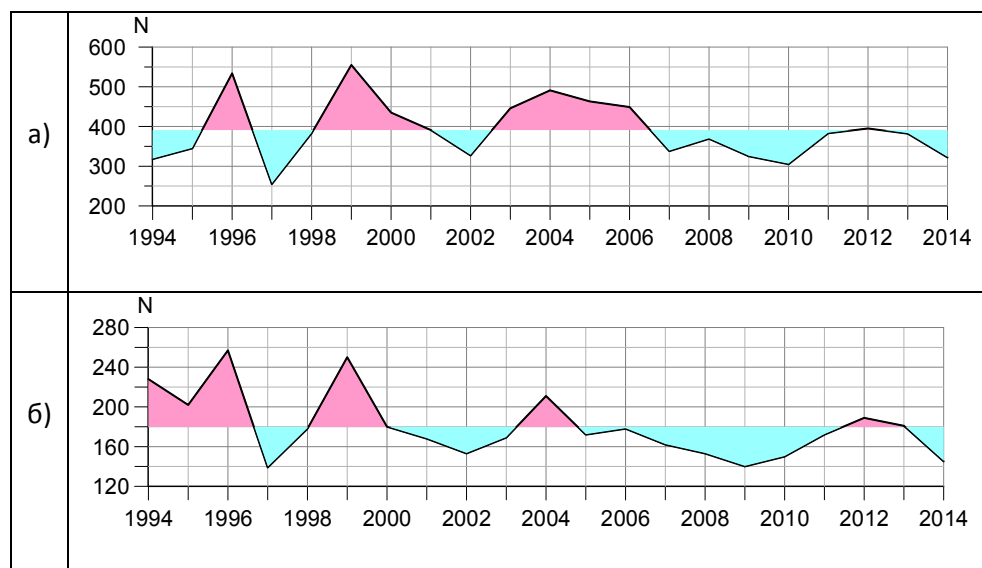


Рисунок 2.4 — Графики распределения сейсмических событий по годам на территории Бишкекского геодинамического полигона и за его пределами в рамках: 40°-44° с.ш. и 70°-81° в.д. (а) и в центральной части полигона- 42°-43.2° с.ш. и 73°-76° в.д. (б). Заливкой выделены периоды снижения и повышения сейсмической активности.

Как видно из приведенного рисунка, с 2006 года наблюдается уменьшение сейсмической активности как на территории Бишкекского геодинамического полигона, так и за его пределами. Для анализа сейсмической активизации на Бишкекском геодинамическом полигоне был использован детальный каталог землетрясений по Северо-Тянь-Шаньской зоне, составленный Институтом сейсмологии НАН КР за период с 1973 г. по 2013 г.; каталог, составленный ИС РАН по данным цифровой сейсмологической сети KNET.

На рисунке 2.5. представлена карта распределения эпицентров сейсмических событий на территории Бишкекского геодинамического полигона.

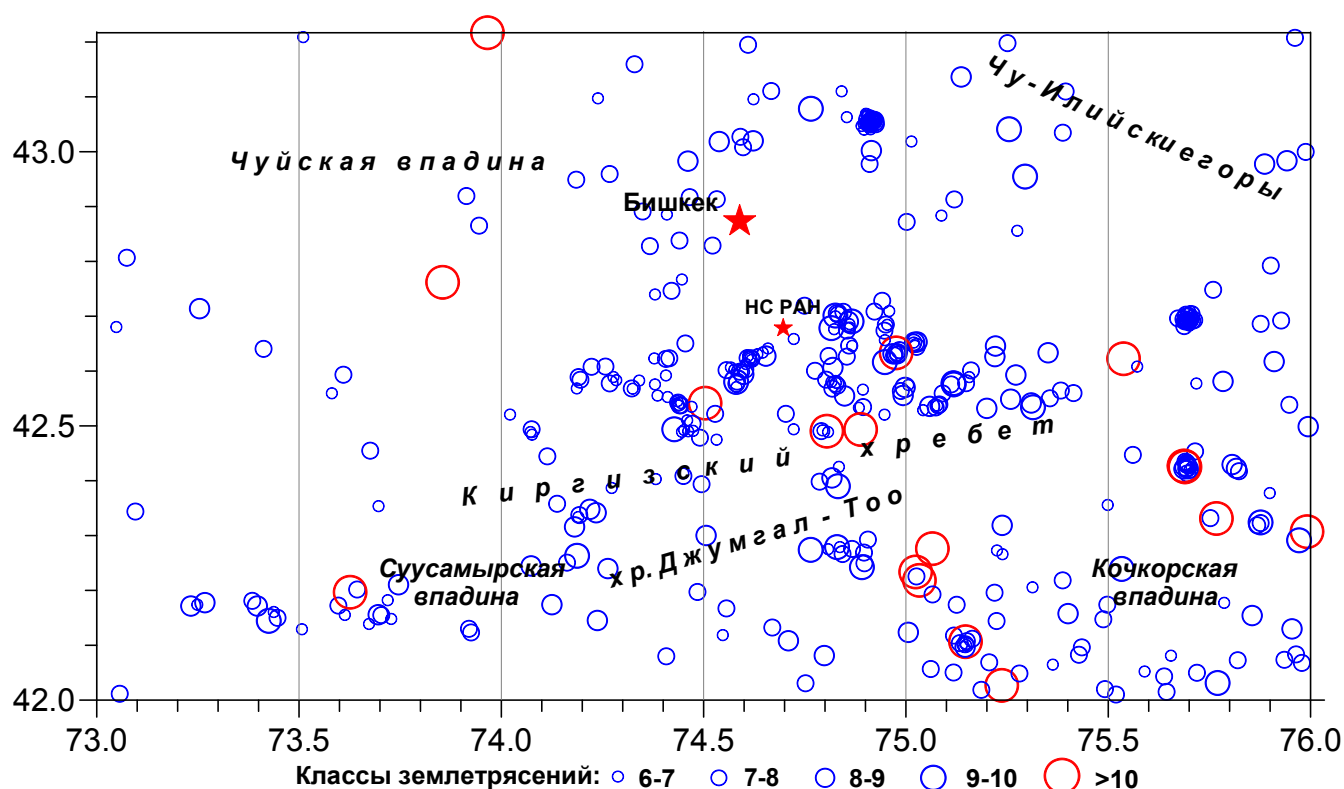


Рисунок 2.5 — Карта распределения эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных сетью KNET в период с 2013 г. по сентябрь 2015 г. в пределах Бишкекского прогностического полигона

В таблице 2.2 приведен каталог землетрясений с $K > 6$, произошедших на территории Бишкекского прогностического полигона.

Таблица 2.2 — Каталог землетрясений за 2015 г.

Дата	Часы	Минуты	Секунды	Широта	Долгота	Глубина	Класс
02.01.2015	14	24	30,93	41,6195	74,6673	7,06	8,15
04.01.2015	15	31	5,3	42,5343	74,8942	13,58	7,62
06.01.2015	19	42	16,65	41,2182	75,3368	9,69	8,32
08.01.2015	9	20	12,62	41,1340	76,1152	6,43	8,14
09.01.2015	6	48	48,29	43,0653	74,9052	0,08	6,32
09.01.2015	7	2	55,72	43,0463	74,9045	1,8	6,12
10.01.2015	14	30	10,67	43,0783	74,7650	18,62	9,88

Продолжение таблицы 2.2

11.01.2015	16	45	20,98	41,1985	73,9895	3,81	8,06
16.01.2015	8	37	32,2	42,6503	74,4548	16,99	7,33
16.01.2015	13	52	37,22	42,7088	76,2620	23,41	8
17.01.2015	16	17	38,96	42,5940	74,5992	9,25	8,21
17.01.2015	17	17	37,95	42,5985	74,5998	8,36	6,51
18.01.2015	1	19	49,3	43,1098	75,3947	6,71	7,4
18.01.2015	21	25	55,24	41,5543	74,8195	16,64	6,71
20.01.2015	6	52	38,3	42,3318	75,7525	7,15	7,66
21.01.2015	9	10	23,01	41,2807	72,5050	0,06	10,49
22.01.2015	13	23	11,83	42,0727	75,8200	7	7,08
22.01.2015	15	52	27,18	42,2183	75,0333	6,37	12,89
23.01.2015	0	51	30,31	42,2790	74,8297	13,47	9,03
23.01.2015	18	59	21,65	42,1672	74,5563	16,2	7,98
24.01.2015	16	19	36,91	42,6793	74,8615	8,32	6,21
27.01.2015	13	33	51,22	43,4782	73,7765	2,5	7,01
29.01.2015	9	43	2,76	42,1177	75,1187	16,96	7,27
02.02.2015	4	43	22,34	42,5375	74,4437	12,78	7,23
02.02.2015	5	30	19,31	42,5373	74,4373	11,93	6,05
04.02.2015	14	9	12,98	41,6700	73,2027	0,03	8,3
05.02.2015	9	40	23,98	41,3008	73,4173	5,08	7,91
05.02.2015	14	10	19,11	42,1553	73,6132	9,56	6,66
07.02.2015	6	2	49,75	43,4215	74,2097	25,73	8,06
07.02.2015	22	11	23,46	42,6078	74,2230	12,1	7,1

Продолжение таблицы 2.2

08.02.2015	5	45	46,03	42,1480	73,7278	8,06	6,67
09.02.2015	3	35	23,66	42,3900	74,8318	7	9,87
09.02.2015	13	49	25,28	42,7397	74,3798	23,14	6,84
09.02.2015	19	35	23,51	42,9427	76,9330	14,41	9,31
12.02.2015	5	33	44,6	43,0502	74,9013	4,99	6,3
12.02.2015	9	50	21,01	41,1555	76,1395	0,12	7,45
13.02.2015	12	46	55,7	41,2977	76,7648	0,01	9,95
15.02.2015	6	27	25,57	41,3972	74,5440	7	6,77
15.02.2015	11	58	48,95	42,6465	74,8595	10,85	7,23
17.02.2015	6	39	9,93	42,0115	73,0568	2,02	7,48
18.02.2015	18	3	57,02	42,4925	74,4518	8,66	6,86
19.02.2015	23	43	40,13	41,5575	74,1625	16,41	8,16
20.02.2015	0	12	29,48	41,5555	74,1485	16,18	7,55
20.02.2015	2	18	1,08	41,5843	74,1402	0,05	7,02
22.02.2015	2	24	36,69	41,4498	73,1440	0,24	7,24
22.02.2015	2	44	39,11	42,6038	76,1222	4,34	8,65
22.02.2015	3	55	57,29	42,5895	76,1025	6,06	7,31
23.02.2015	10	25	48,48	41,4502	76,0868	6,61	8,67
26.02.2015	4	15	58,84	43,0587	74,9240	3,06	6,68
28.02.2015	18	9	8,37	42,0268	75,2368	17,08	10,76
01.03.2015	22	46	37,07	42,5680	74,8180	10	7,66
02.03.2015	7	55	28,98	42,5933	73,6097	16,84	7,02
02.03.2015	21	37	31,36	42,4888	74,0720	16,36	6,31

Продолжение таблицы 2.2

03.03.2015	15	32	18,5	42,2337	75,0240	15,81	10,08
04.03.2015	4	13	8,59	41,4645	76,1930	0,04	7,52
06.03.2015	23	18	45,39	41,8635	74,3742	15,84	7,32
09.03.2015	10	19	6,36	41,8665	74,3785	15,26	6,93
10.03.2015	10	50	53,02	42,1715	73,3968	0,02	8,31
11.03.2015	14	8	32,61	41,6443	75,9185	7,69	8,26
12.03.2015	22	10	50,27	42,5553	74,3860	16,63	6,97
14.03.2015	12	30	4,76	42,0307	74,7518	19,65	7,67
15.03.2015	12	57	28,71	42,2398	74,2633	16,42	8,03
15.03.2015	14	1	0,41	43,0095	76,8868	13,46	11,96
16.03.2015	2	35	36,64	40,9660	73,4018	12,66	7,53
16.03.2015	2	37	22,43	40,9858	73,3885	8,84	8,93
19.03.2015	20	2	29,43	42,7838	76,3445	7,05	7,2
20.03.2015	1	26	37,5	42,9997	75,9880	21,67	7,12
22.03.2015	13	40	3,25	42,5527	74,4110	0,02	6,43
22.03.2015	14	18	12	41,0255	76,6663	0	7,63
25.03.2015	8	45	49,82	42,0432	75,6382	7,06	7,47
26.03.2015	2	1	5,1	43,9402	76,8595	0,01	8,46
28.03.2015	19	33	9,81	42,5417	74,4443	12,7	6,93
28.03.2015	20	55	11,71	42,3312	75,7673	9	10,53
03.04.2015	3	42	54,32	42,2690	74,8963	18,72	7,51
03.04.2015	5	58	25,3	42,5662	74,8937	11,5	6,47
03.04.2015	16	27	26,39	42,8963	76,4280	7	7,08

Продолжение таблицы 2.2

03.04.2015	20	17	0,74	42,9775	75,8865	20,58	8,7
06.04.2015	9	50	52,99	42,4748	74,5320	17,55	6,92
06.04.2015	17	53	41,17	42,1323	74,6697	15,65	7,96
07.04.2015	22	19	26,88	42,1577	75,4007	7,1	8,88
08.04.2015	3	35	30,31	42,5415	74,5037	14,16	10,2
11.04.2015	21	25	30,66	41,8865	74,3890	5,62	7
15.04.2015	3	4	30,56	42,2663	74,8433	20,11	7,62
15.04.2015	11	16	24,13	43,2427	76,5843	21,39	8,49
16.04.2015	10	32	1,37	41,6293	73,2943	16,42	7,68
17.04.2015	22	12	4,55	42,1233	73,9252	7	7,51
19.04.2015	15	15	49,13	41,4528	74,7645	0,18	6,8
20.04.2015	9	28	46,51	42,1715	73,2327	10,38	8,04
20.04.2015	11	19	38,13	41,8347	75,3430	17,3	7,8
23.04.2015	10	39	45,52	42,2103	73,7458	5,06	8,92
24.04.2015	12	2	49,24	43,1595	74,3292	7	7,29
25.04.2015	8	48	14,4	42,1300	73,9200	6,76	7,3
26.04.2015	20	36	38,8	42,5757	75,1180	12,25	9,05
26.04.2015	20	41	52,89	42,5778	75,1175	12,29	9,26
26.04.2015	21	49	41,12	42,5757	75,1118	13,68	7,26
27.04.2015	3	53	40,71	42,5040	74,4725	10,52	7,85
01.05.2015	17	36	58,08	43,1102	74,8410	15,25	6,98
02.05.2015	2	36	6,03	42,1388	73,6730	11,41	6,66
03.05.2015	10	37	57,54	41,0663	75,0357	0,06	7,94

Продолжение таблицы 2.2

03.05.2015	12	8	48,07	41,0125	76,7647	2,99	7,73
04.05.2015	11	19	54,92	42,5812	75,7837	21,98	8,32
04.05.2015	12	17	32,17	41,0198	74,5218	0,01	7,44
05.05.2015	19	3	4,91	44,3667	74,3573	3,74	6,98
08.05.2015	20	51	44,51	42,9172	74,4655	6,8	7,61
11.05.2015	19	50	26,59	42,0498	75,7192	7,14	7,05
13.05.2015	5	26	10,58	42,0200	75,4918	7,08	7,54
14.05.2015	3	13	11,55	41,5115	74,8478	18,51	7,95
15.05.2015	4	13	30,55	42,2392	75,5332	7,21	9,09
30.05.2015	23	31	17,62	42,8628	77,5947	4,09	7,81
31.05.2015	2	11	48,96	41,6130	73,3567	6,8	7,48
02.06.2015	8	4	44,39	42,5827	74,3407	6,16	6,54
03.06.2015	9	20	44,38	41,1080	73,7122	3,44	8,04
04.06.2015	7	59	35,24	41,0305	76,8845	0,01	7,95
06.06.2015	14	23	23,38	43,0347	75,3877	18,32	7,63
08.06.2015	4	50	18,43	41,8340	72,8000	2,89	10,91
11.06.2015	13	2	32,76	41,1832	75,3012	2,91	8,56
11.06.2015	18	4	38,25	42,9828	74,4612	18,58	8,11
14.06.2015	15	35	32,65	41,8270	72,6438	0,04	8,53
17.06.2015	17	25	13,62	41,8953	77,5387	0,01	8,90
18.06.2015	17	39	16,65	41,3295	75,4125	15,27	8,08
18.06.2015	18	20	2,78	41,3183	75,3898	10,54	8,14
18.06.2015	20	52	30,00	42,5555	74,9930	17,07	8,39

Продолжение таблицы 2.2

21.06.2015	20	46	12,88	42,6012	75,1608	14,45	7,39
21.06.2015	23	40	18,48	42,7618	73,8548	14,94	10,45
23.06.2015	22	6	12,63	42,6235	74,6155	6,63	6,97
30.06.2015	18	3	7,15	42,2143	76,4103	12,76	7,51
04.07.2015	3	13	7,50	42,6457	75,2213	7,00	8,16
05.07.2015	14	49	43,66	42,2757	74,8668	18,54	7,64
08.07.2015	19	32	3,82	41,2993	72,5982	4,38	8,45
10.07.2015	0	31	57,89	41,1368	74,1340	0,01	11,36
10.07.2015	0	42	6,28	41,1107	74,1365	0,00	9,19
12.07.2015	5	7	58,52	42,5418	75,3097	16,03	8,10
15.07.2015	18	54	8,51	42,0810	75,6550	5,67	6,94
18.07.2015	10	11	26,57	40,9307	73,9950	0,03	9,37
18.07.2015	18	39	10,66	41,0658	76,1780	2,92	8,77
24.07.2015	19	14	57,90	42,3187	75,2378	13,84	8,70
27.07.2015	3	46	12,98	43,0427	77,1250	23,70	8,79
27.07.2015	20	0	22,10	42,0962	75,4347	21,66	7,27
30.07.2015	3	54	45,97	43,7898	75,5643	0,02	7,35
31.07.2015	10	21	15,56	43,3162	74,6968	3,08	6,55
02.08.2015	16	13	17,05	42,2580	76,3095	13,11	8,54
03.08.2015	6	17	34,42	41,6678	74,3017	0,00	7,05
03.08.2015	18	38	52,21	42,2790	74,8368	5,39	6,58
04.08.2015	18	10	37,96	42,3722	75,7805	7,56	6,99
05.08.2015	1	34	2,41	42,6065	74,8195	16,19	8,08

Продолжение таблицы 2.2

05.08.2015	15	22	56,04	40,8377	73,3177	0,01	8,64
08.08.2015	4	37	4,41	41,3210	73,5063	1,17	8,63
09.08.2015	4	21	22,41	42,5425	74,4368	11,09	7,31
10.08.2015	12	31	4,33	41,0930	74,1087	0,01	11,28
10.08.2015	12	45	51,64	41,1163	74,1020	0,00	10,89
10.08.2015	13	6	1,93	41,1198	74,1030	0,00	7,51
10.08.2015	13	14	27,38	41,0695	74,0758	3,00	6,94
10.08.2015	13	46	4,05	41,0897	74,0692	3,06	7,73
10.08.2015	14	39	36,39	41,0902	74,0797	1,42	6,93
10.08.2015	16	52	53,71	41,1030	74,1200	0,01	10,00
14.08.2015	9	0	53,27	43,3007	74,6820	0,00	7,01
17.08.2015	2	15	4,40	42,1958	75,2190	12,78	7,97
19.08.2015	7	40	50,64	41,0995	74,1053	0,00	9,66
20.08.2015	2	8	20,26	41,7002	74,7597	0,03	7,47
22.08.2015	8	0	22,44	42,7012	74,8257	11,71	9,18
22.08.2015	14	58	23,52	42,6998	74,8260	11,35	6,84
23.08.2015	13	17	3,37	42,7192	74,7493	10,27	7,57
24.08.2015	18	7	13,89	42,7055	74,8290	11,26	7,31
27.08.2015	10	4	44,91	42,2847	76,4415	18,51	8,41
27.08.2015	11	22	54,15	42,4840	74,0758	16,60	6,52
27.08.2015	16	2	15,65	42,0187	75,1863	18,21	7,61
28.08.2015	3	46	5,95	43,0580	74,9192	0,02	7,02
28.08.2015	4	44	47,85	42,2610	76,4283	16,08	7,66

Продолжение таблицы 2.2

28.08.2015	14	48	1,90	42,5385	75,9475	4,15	7,98
28.08.2015	16	50	9,80	43,1692	76,7532	30,53	7,93
28.08.2015	23	2	12,30	41,2780	73,7077	4,52	10,79
31.08.2015	1	42	3,18	41,7152	75,7998	13,76	10,10
02.09.2015	12	10	58,85	43,3227	74,6450	0,02	6,82
02.09.2015	18	45	8,59	41,5847	74,6587	17,09	9,64
05.09.2015	20	34	12,21	41,3130	75,6632	0,02	11,30
08.09.2015	3	56	12,15	42,4987	75,9942	7,00	8,26
09.09.2015	3	46	39,90	41,1143	74,0838	0,06	8,87
09.09.2015	13	29	2,64	44,3793	74,3277	1,49	7,32
09.09.2015	18	32	51,68	42,3438	73,0955	7,62	7,20
09.09.2015	22	55	26,52	40,9913	72,7698	11,01	8,28
11.09.2015	8	0	56,80	43,2567	74,7407	7,00	7,53
11.09.2015	11	58	13,35	43,0185	74,5385	14,58	8,23
14.09.2015	12	9	46,60	42,6530	75,0275	6,97	8,91
14.09.2015	12	12	36,63	42,6525	75,0213	7,68	8,01
14.09.2015	16	30	52,95	42,6442	75,0267	7,53	7,09
15.09.2015	17	15	11,00	42,6305	74,9805	9,24	7,22
16.09.2015	19	39	6,24	43,6200	73,9295	1,22	7,45
17.09.2015	19	11	22,09	42,6522	75,0185	7,34	7,43
17.09.2015	20	22	28,15	42,6520	75,0193	7,41	6,81
18.09.2015	2	29	41,29	43,3097	75,4707	7,00	7,87
18.09.2015	19	22	20,61	42,7030	74,8325	11,28	7,25

Продолжение таблицы 2.2

20.09.2015	16	9	15,54	41,1555	73,5693	0,00	11,35
21.09.2015	8	32	59,95	41,7492	77,4980	0,28	8,60
21.09.2015	9	5	51,49	41,7460	77,5157	0,08	10,27
22.09.2015	3	4	24,93	42,6462	75,0222	7,80	6,70
25.09.2015	1	54	20,84	43,3905	74,1027	15,25	8,03
29.09.2015	2	26	34,24	43,0628	74,9117	5,27	6,55
30.09.2015	21	32	10,86	41,6090	73,2973	12,47	8,42

Анализ каталога землетрясений показал, что период с 2013 г. по сентябрь 2015 г. характеризовался стабильным сейсмическим режимом.

На рисунках 2.6-2.11 представлены временные ряды изменений кажущегося удельного электрического сопротивления за период с 2013 по октябрь 2015 гг. соответственно на стационарных и на рядовых пунктах (обслуживаемых автомобильной станцией) электромагнитного мониторинга.

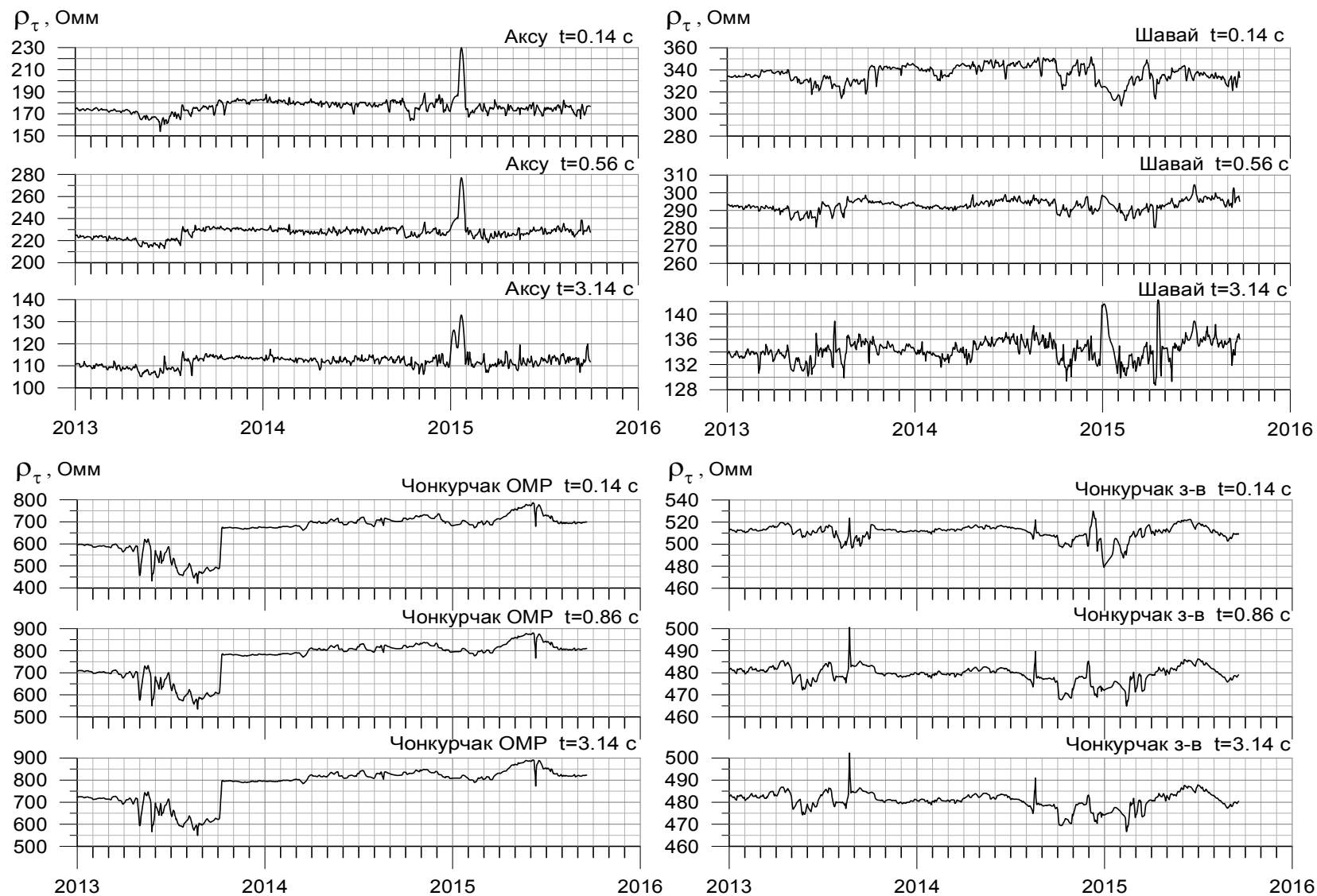


Рисунок 2.6 — Графики изменения удельного электросопротивления в трех горизонтах земной коры на стационарных станциях Аксу, Шавай, Чон-Курчак за период с 2013 г. по сентябрь 2015 г.

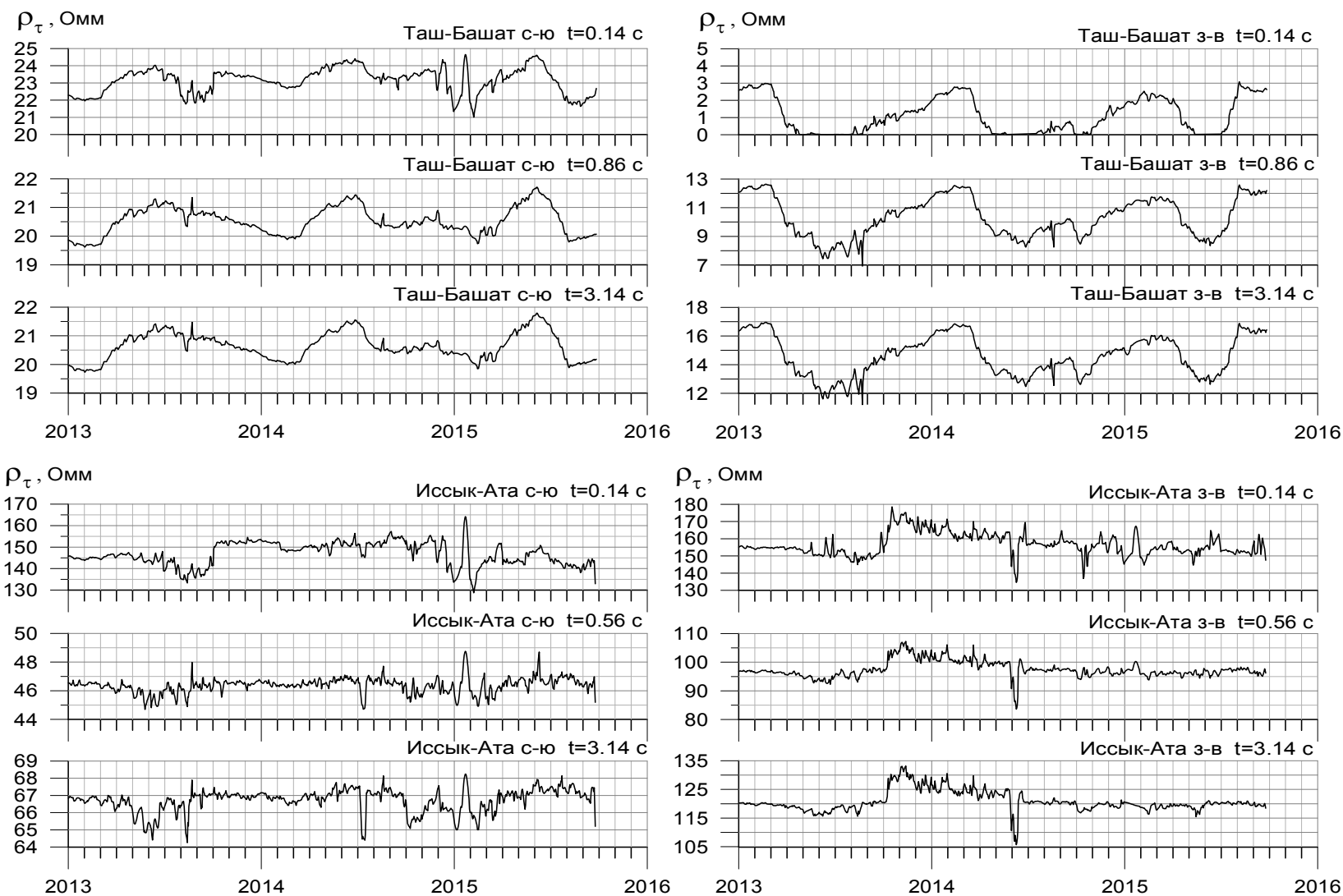


Рисунок 2.7 — Графики изменения удельного электросопротивления в трех горизонтах земной коры на стационарных станциях Таш-Башат и Иссык-Ата за период с 2013 г. по сентябрь 2015 г.

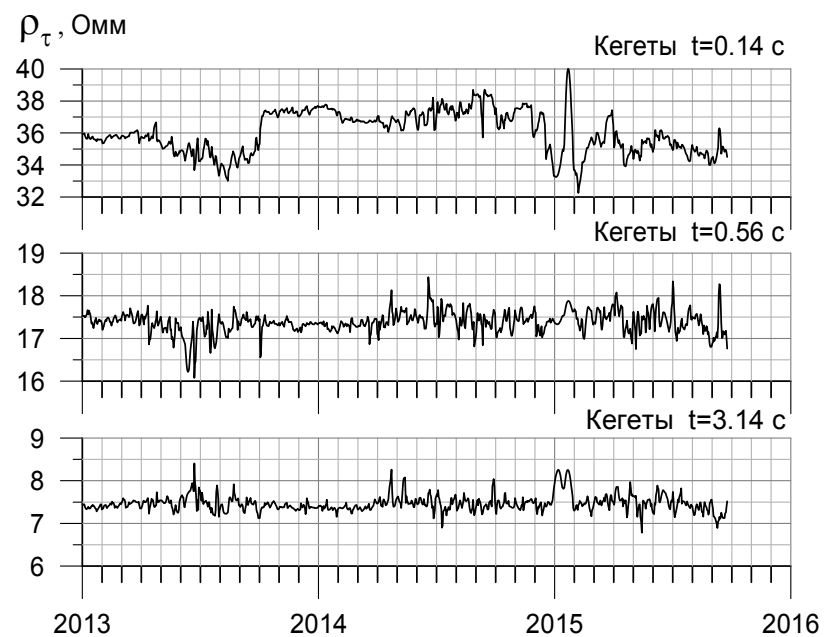


Рисунок 2.8 — Графики изменения удельного электрического сопротивления в трех горизонтах земной коры на стационарной станции Кегеты за период с 2013 г. по сентябрь 2015 г.

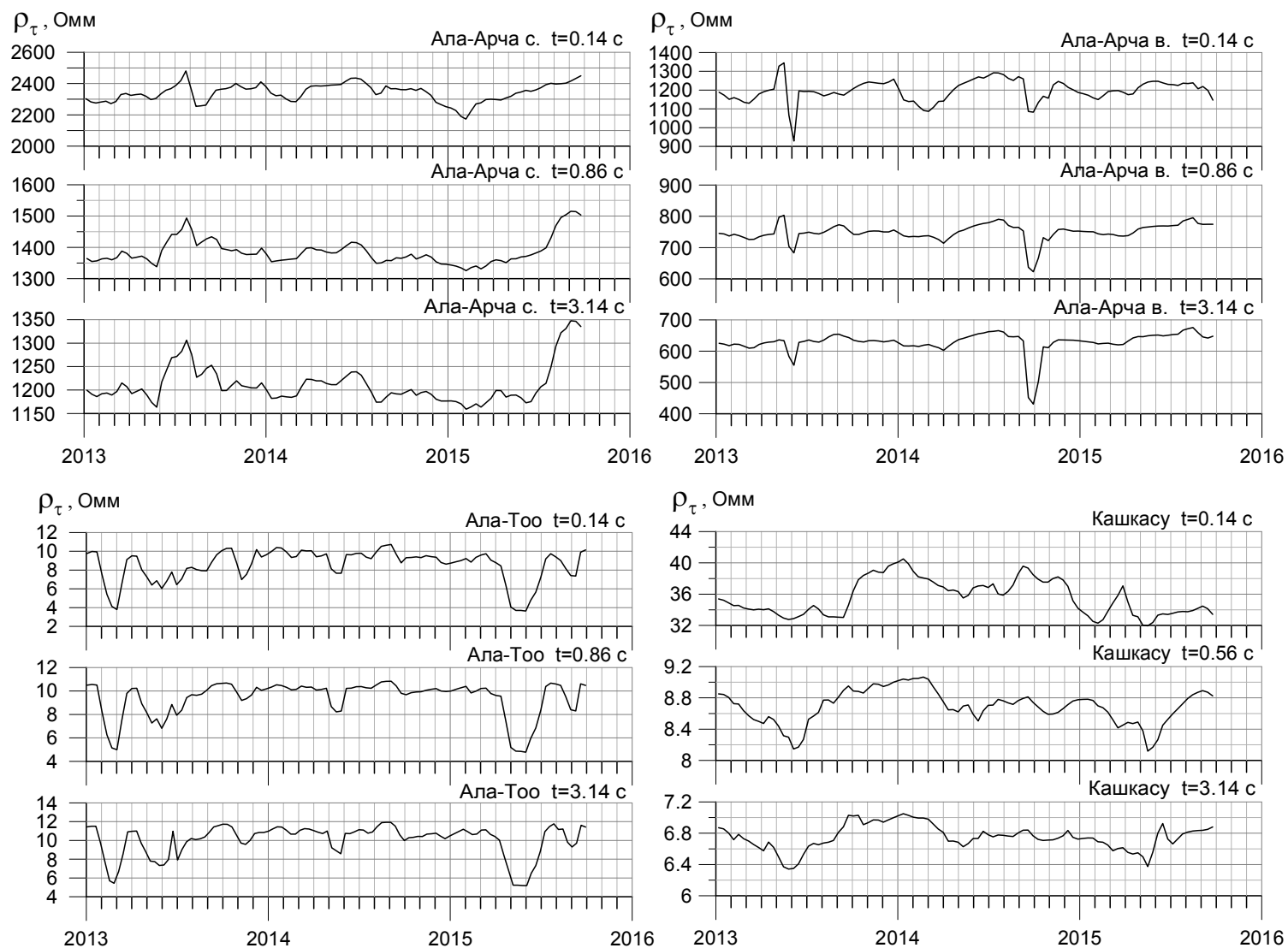


Рисунок 2.9 — Графики изменения удельного электрического сопротивления в трех горизонтах земной коры на рядовых пунктах Ала-Арча с., Ала-Арча в., Ала-Тоо, Кашкасу, обслуживаемых автомобильной станцией, за период с 2013 г. по сентябрь 2015 г.

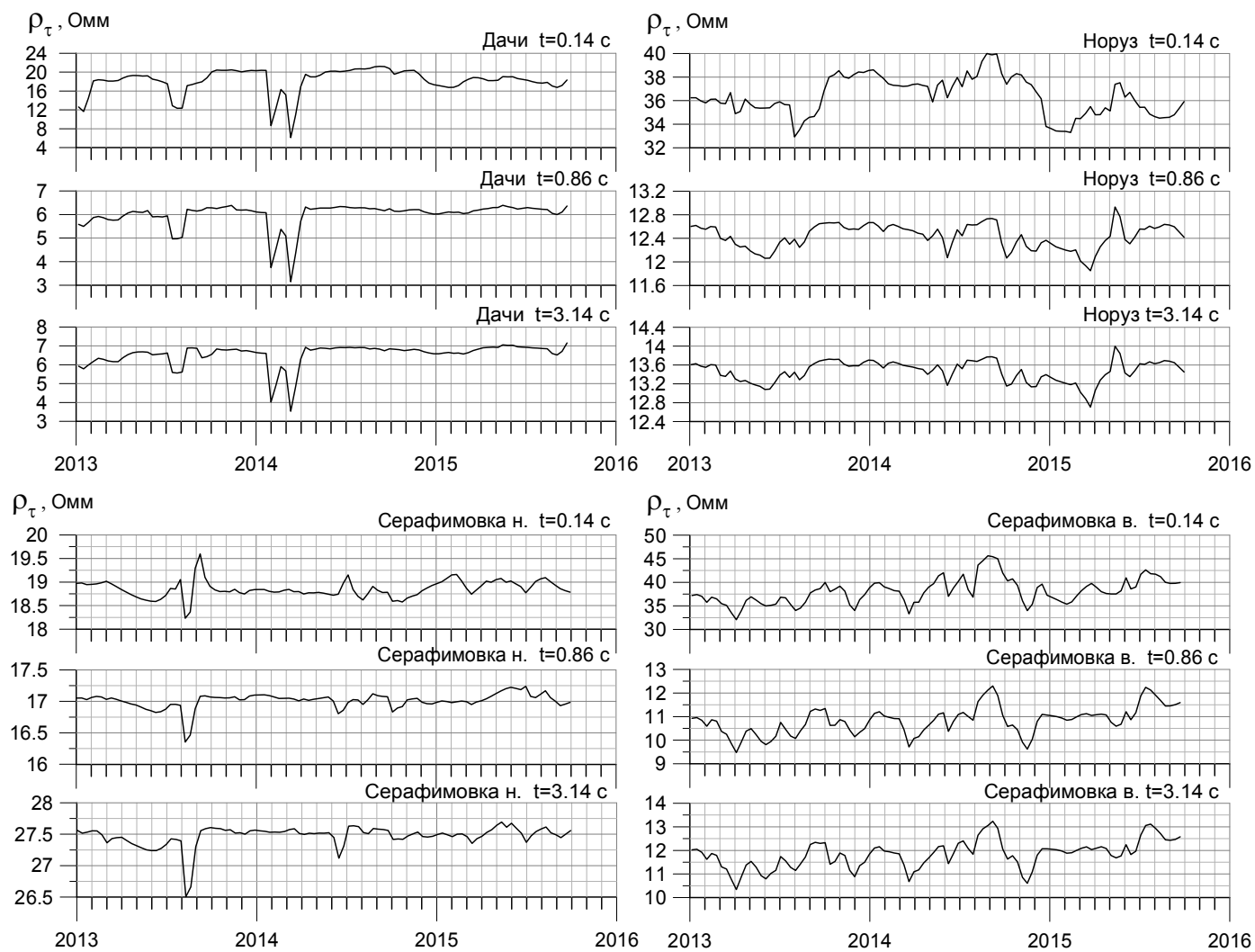


Рисунок 2.10 — Графики изменения удельного электрического сопротивления в трех горизонтах земной коры на рядовых пунктах Дачи, Серафимовка н., Серафимовка в., Норуз, обслуживаемых автомобильной станцией, за период с 2013 г. по сентябрь 2015 г.

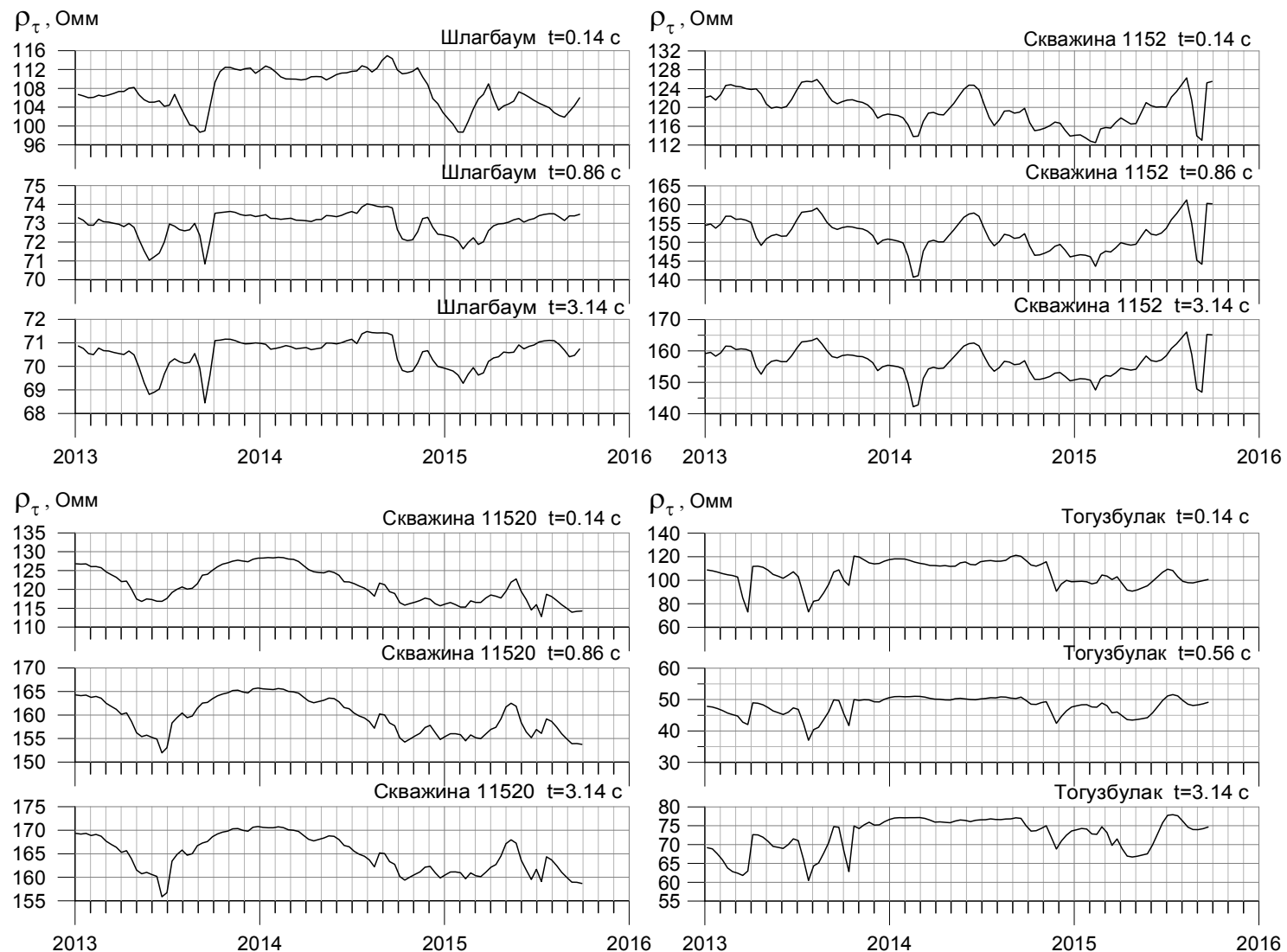


Рисунок 2.11 — Графики изменения удельного электрического сопротивления в трех горизонтах земной коры на рядовых пунктах Шлагбаум, Скважина 1152, Скважина 11520, Тогузбулак, обслуживаемых автомобильной станцией, за период с 2013 г. по сентябрь 2015 г.

Как видно из рисунков 2.6 - 2.11, практически на всех графиках ρ_t в большей или меньшей степени проявились вариации электрического сопротивления, совпадающие с землетрясениями. Наиболее значимым событием в отчетный период было землетрясение 14.11.2014 г. с $K=13.98$ в прибрежной зоне оз. Иссык-Куль, в 7 км к северо-востоку от п. Каджисай, последствия которого ощущались даже в столице республики. Землетрясение предвлялось полным сейсмическим затишьем, наблюдавшемся на Бишкекском геодинимическом полигоне с 30 октября по 11 ноября 2014 г. С момента землетрясения на некоторых стационарных пунктах электромагнитного мониторинга, расположенных главным образом в его восточной части (пп. Чонкурчак (с-ю), Иссык-Ата (с-ю), Кегеты), достаточно длительное время - вплоть до середины февраля, происходит монотонное снижение кажущегося удельного электрического сопротивления (рисунки 2.6-2.8). На ниспадающих участках графика ρ_t отмечаются отдельные локальные вариации разного знака и интенсивности. Аналогичная картина наблюдается и на полевых пунктах ЗСД (рисунки 2.9-2.11), например, на пунктах Ала-Арча в., Ала-Арча с., Тогузбулак, Дачи. По всей видимости, вышеупомянутое землетрясение 14.11.2014 г. способствовало активизации сейсмического процесса в регионе. В значительной степени возросло число событий с $K>10$, эпицентры большинства из которых расположены к северу, западу и к юго-западу от оз. Иссык-Куль. Наибольший интерес представляют те из них, которые находятся в радиусе не более 100 км от центра сети мониторинга. Они расположены вдоль некоторой линии, протянувшейся с юго-востока, от хребта Сонг-Кель до предгорьев Киргизского хребта в районе г. Кара-Балта (рисунок 2.12).

С событием, имевшем место 22.01.15 г. ($K=12,89$) в долине р. Вост. Сёок, в 19 км к западу от Кочкорской впадины, могут быть связаны аномальные проявления ρ_t (рисунки 2.6-2.7) на временных рядах крайних западных стационарных пунктов Аксу, Шавай и на востоке полигона – на пунктах Иссык-Ата (с-ю) и Кегеты (рисунок 2.8). На временных рядах наблюдается резкий минимум в декабре 2014 года, который сменяется внезапным и быстрым ростом кажущегося электрического сопротивления. Вариации происходят синхронно и по всей толще геоэлектрического разреза. Обнаруживается некоторая закономерность в поведении ρ_t : наибольшие изменения электросопротивления происходят в верхней части разреза (графики ρ_t для $t=0.14$ с); с увеличением времени становления поля (а значит, и глубины зондирования) интенсивность аномалий ρ_t снижается.

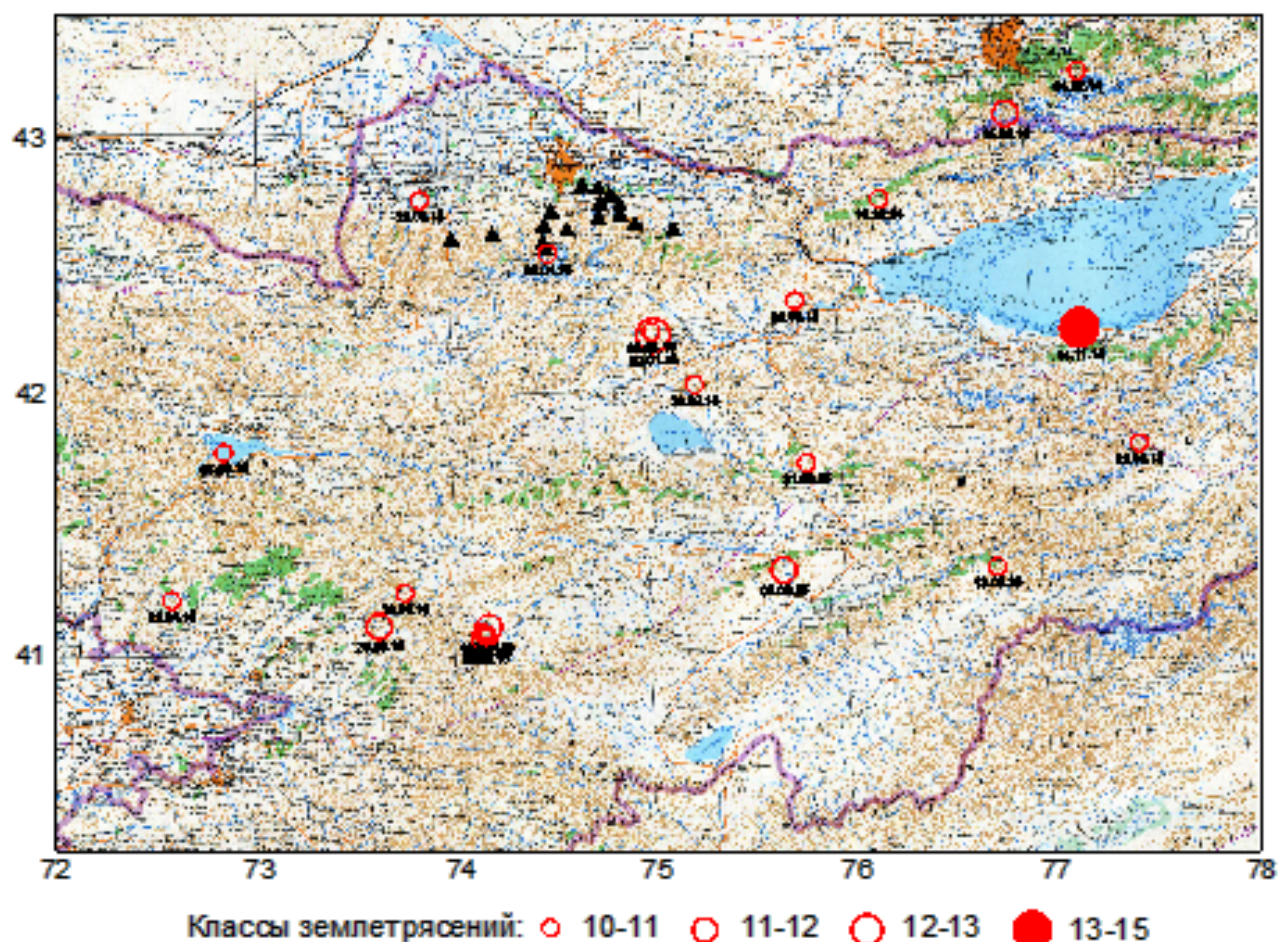


Рисунок 2.12 — Распределение эпицентров землетрясений с $K > 10$ в пределах территории: 40° - 44° с.ш. и 72° - 78° в.д. в период с 14.11.2014 г. по 30.09.2015 г.

Например, на стационарном пункте Аксу рост кажущегося удельного электрического сопротивления в приповерхностных горизонтах земной коры составил 32.8%, а в нижней части разреза (на глубине порядка 20 км) – 21.7%; в Иссык-Ате (с-ю) – 22% и 5%, в пункте Кегеты- 20.5% и 10% соответственно.

С событиями в феврале-марте 2015 г. (28.02.15 г. с $K=10.76$, на водоразделе хребта Кызарт; 03.03.15 г. с $K=10.08$ и эпицентром в зоне январского землетрясения 22.01.15 г. и 28.03.15 г. с $K=10.53$ и очагом в юго-восточном окончании Киргизского хребта) связаны, за редким исключением (пп. Шавай и Чонкурчак (з-в)), аномалии небольшой интенсивности на ряде стационарных и рядовых пунктов ЗСД. Однако следует обратить внимание на наличие определенного числа более слабых землетрясений, в том числе и вблизи пунктов мониторинга, предвещающих вышеуказанные события или совпадающие с ними по времени. В первую очередь речь идет о событиях, эпицентры которых расположены в южной окраинной части сети ЗСД, в

тектонически активной зоне сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины. По всей вероятности, в наблюдаемых вариациях кажущегося электрического сопротивления находят отражение и различные этапы их подготовки. При существующей дискретности измерений, особенно на полевых пунктах мониторинга (1 наблюдение в неделю), а также с учетом частоты, с которой случаются землетрясения (в среднем - не менее 2-х в сутки), интерпретация наблюдаемых вариаций ρ_t , особенно на полевых пунктах ЗСД, оказывается порой весьма затруднительной. Подобным образом можно найти соответствие со всеми событиями, произошедшими на территории Бишкекского геодинамического полигона.

Как показали результаты электромагнитных наблюдений в 2015 г., вариации ρ_t отражают изменения напряженно-деформированного состояния геосреды не только перед сколько-нибудь значимыми сейсмическими событиями. На временных рядах ρ_t , относящихся к пп. Аксу, Шавай, Иссык-Ата, Ала-Тоо и в особенности на пунктах Ала-Арча с. и Скважина 1152, причиной аномальных проявлений электросопротивления послужила целая серия слабых землетрясений 6-8 классов, произошедших с 14 по 22 сентября вблизи станции Иссык-Ата (п. 5), в 2-5 км к северо-востоку от неё (рисунки 2.6-2.7, 2.9-2.11). Наблюдаемые аномальные эффекты по своей величине были вполне соизмеримы с теми, что отмечались в период подготовки сейсмических событий более высокого класса.

2.2 Многомерные диаграммы корреляций компонент напряженно-деформированного состояния геосреды и электромагнитных параметров (по данным магнитотеллурического мониторинга)

Экспериментальное изучение геодинамических процессов внутриконтинентального орогена возможно, прежде всего, на основе непрерывного мониторинга геофизических полей. В настоящий момент территория Бишкекского геодинамического полигона покрыта плотной сетью сейсмических станций и GPS-наблюдений, сетью электромагнитного мониторинга. На основе анализа динамики электромагнитных параметров по данным непрерывного магнитотеллурического мониторинга могут быть оценены геометрические характеристики напряженно-деформированного состояния геосреды, т. е. в первую очередь это направления осей растяжения и сжатия [33-35]. Проявление энергетических характеристик процессов деформирования в динамике вариаций электромагнитных параметров в результатах МТ-мониторинга изучено еще очень слабо, только на феноменологическом уровне.

В настоящем отчете мы рассмотрим многомерные диаграммы корреляций компонент напряженно-деформированного состояния геосреды и электромагнитных параметров, построение которых было начато на территории миниполигона Кентор в 2014 году. Мониторинговые

наблюдения с помощью метода магнитотеллурического зондирования выполняются на Бишкекском геодинамическом полигоне (БГП) с 2003 года, когда канадская компания «Феникс Геофизикс» совместно с Научной станцией РАН установила две станции Феникс MTU-5D на стационарных пунктах Аксу и Чон-Курчак. Обе станции находятся на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП), который в свою очередь является частью Северо-Тяньшаньской сейсмогенерирующей зоны (рис.2.13), регистрация данных осуществляется круглосуточно в интервале периодов 0,01-1000 с. В процессе осуществления непрерывных магнитотеллурических наблюдений не реже одного раза в 3 месяца контролируются такие характеристики измерительной системы как стабильность коэффициента передачи канала и форма амплитудно-фазовой частотной характеристики.

Для стационарных пунктов мониторинговой сети БГП были выполнены работы по изучению глубинного геоэлектрического строения полигона с помощью таких электроразведочных методов как вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), частотное зондирование (ЧЗ), зондирование становлением поля (ЗС) и магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) [36] с целью установления местоположения аномалиеобразующих объектов в геологической среде.

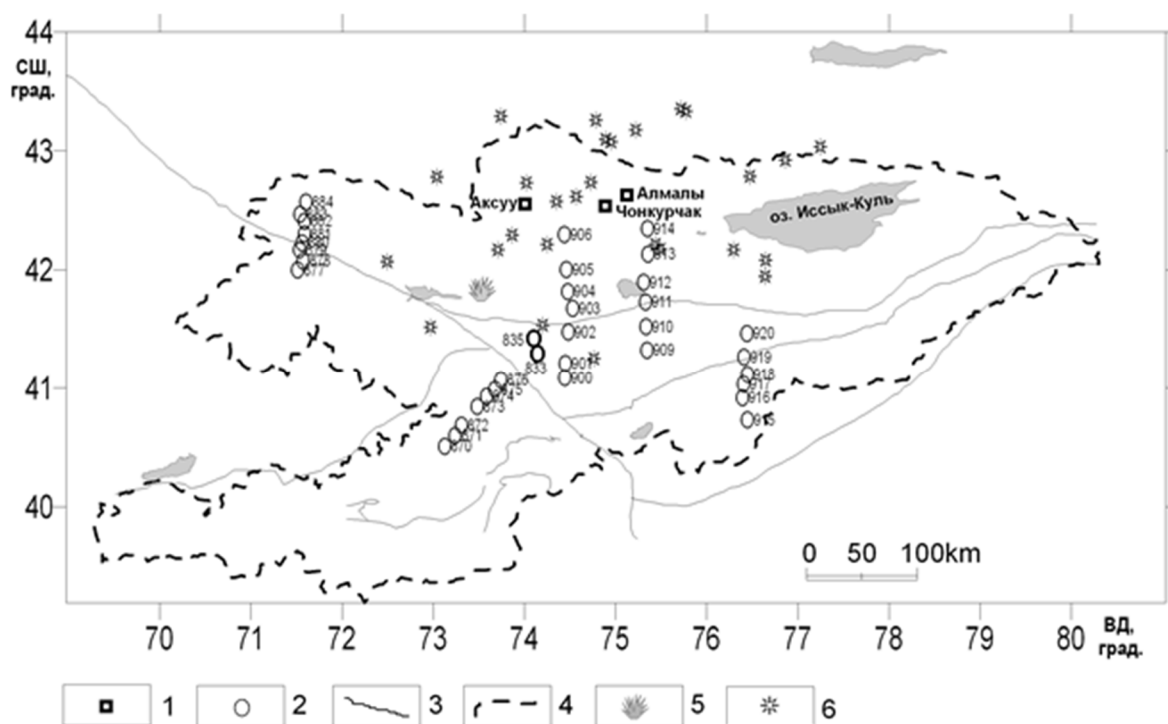


Рисунок 2.13 – Схема расположения стационарных пунктов МТ-мониторинга и ГМТЗ, выполненных на территории Центрального Тянь-Шаня в 2011 г. 1 – пункты стационарных наблюдений МТ-мониторинга, 2 – пункты ГМТЗ, 3 – региональные разломы, 4 – граница Киргизстана, 5 – Камбаратинский взрыв, 6 – сейсмические события, произошедшие за время регистрации ГМТЗ.

В исследованиях, связанных с развитием принципиально новой методики азимутального магнитотеллурического мониторинга, рассматривались временные ряды вариаций (отклонения от среднего) для электромагнитных параметров среды по азимутам $0^\circ - 180^\circ$ в зависимости от периода зондирования. Однако при более детальном анализе временных рядов магнитотеллурического мониторинга оказалось, что представление данных в полярных диаграммах является не только более наглядным, но и может привести к принципиально другим выводам (рис.2.14).

Целью настоящего исследования является развитие методики азимутального магнитотеллурического мониторинга, которое заключается в анализе полученных временных рядов электромагнитных параметров на предмет определения вклада каждой из компонент тензора импеданса в информативность мониторинговых исследований.

Для выбора наиболее чувствительных зон к изменению напряженно-деформированного состояния среды в 2011 году был выполнен эксперимент, который включал в себя 34 пункта зондирования, заложенных в совершенно различных с точки зрения геологии и тектоники условиях (рис.2.13). В результате этого эксперимента были получены оценки изменения кажущегося электрического сопротивления как отклика среды на изменение напряженно-деформированного состояния среды, обусловленное как приливными воздействиями, так и сейсмическими событиями, произошедшими во время проведения эксперимента [1,4].

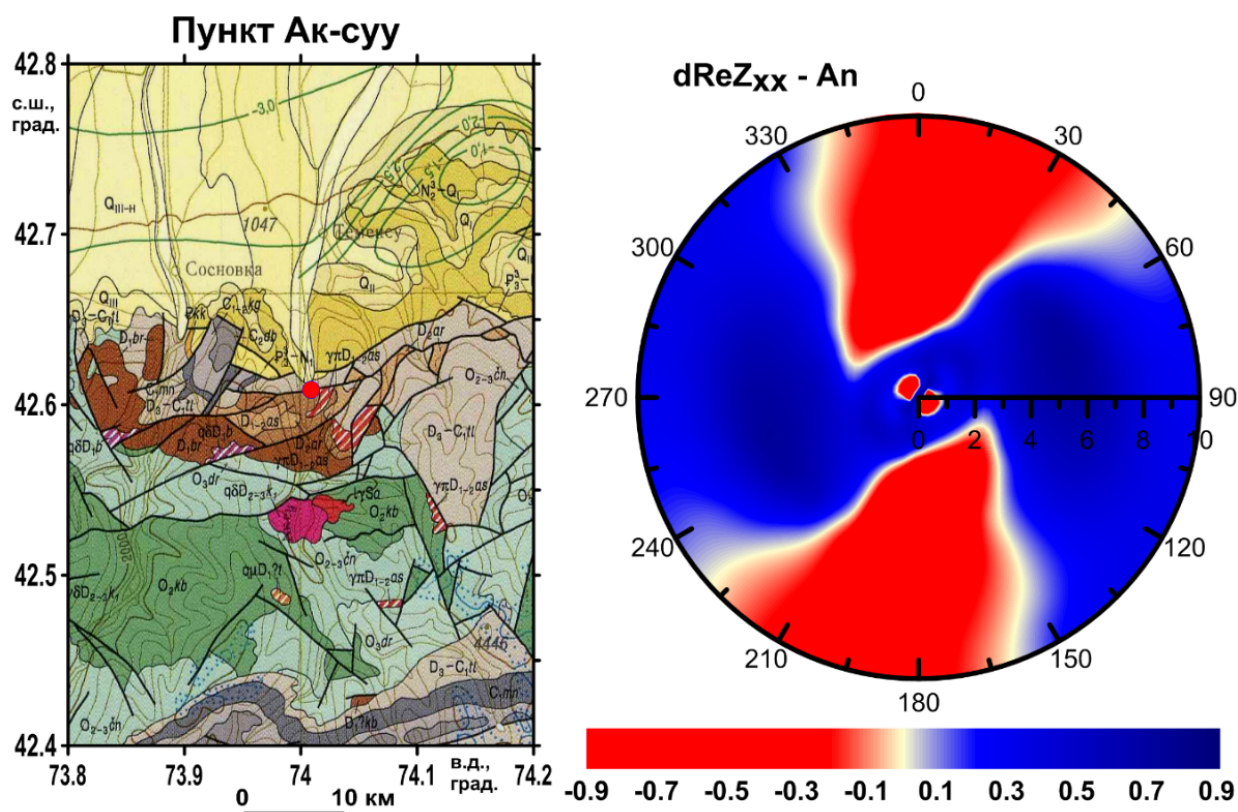


Рисунок 2.14 – Панель слева – фрагмент геологической карты вблизи расположения стационарного пункта МТ-мониторинга Ак-Суу; панель справа - распределение коэффициента корреляции (дополнительный импеданс Z_{xx} и вертикальная компонента приливных воздействий An) в полярных координатах, где по оси радиусов показан $\sqrt{T}$ (Т-период). Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции.

В результате проведенного корреляционного анализа было установлено, что характер взаимосвязи наилучшим образом отражается в распределении характеристик среды на корреляционных полярных диаграммах (рис.2.14, рис. 2.15). В дальнейшем полученные временные ряды электромагнитных параметров были проанализированы на предмет определения вклада каждой из компонент тензора импеданса в информативность мониторинговых исследований. Оказалось, что характер взаимосвязи наилучшим образом отражается в распределении характеристик среды на корреляционных полярных диаграммах (рис.2.16, рис. 2.17). При этом рассматривались как вариации реальных и мнимых компонент основных импедансов, фаз импедансов, кажущегося сопротивления, так и вариации дополнительных импедансов, которые, как оказалось, являются не менее информативные, чем остальные компоненты.

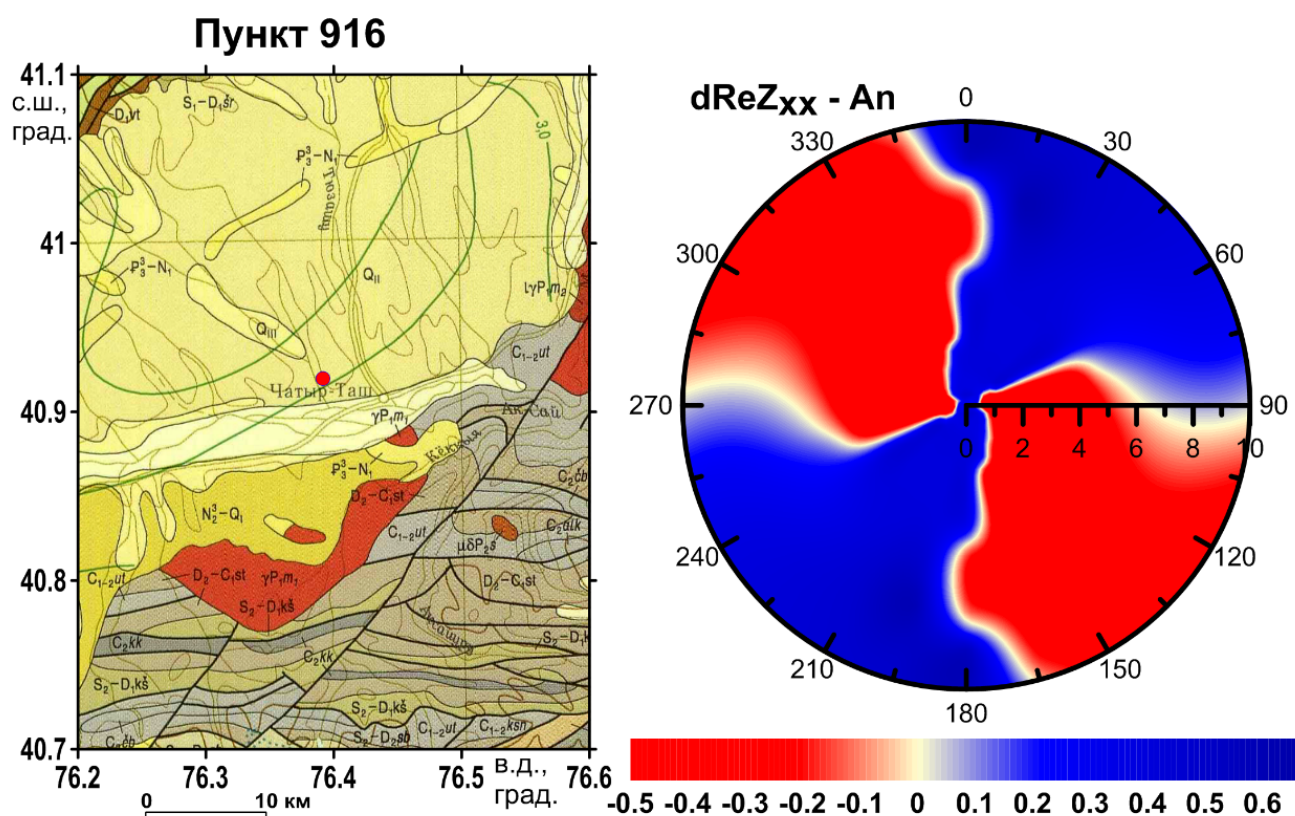


Рисунок 2.15 – Панель слева – фрагмент геологической карты вблизи расположения режимного пункта МТ-мониторинга № 916; панель справа - распределение коэффициента корреляции (дополнительный импеданс Z_{xx} и вертикальная компонента приливных воздействий An) в полярных координатах, где по оси радиусов показан $\sqrt{T}$ (Т-период). Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции.

Поведение всех электромагнитных параметров рассматривалось по 12 азимутам и в сопоставлении с вариациями всех компонент лунно-солнечных приливных воздействий. Те пункты наблюдений, для которых коэффициент корреляции между компонентами электромагнитного поля и гравитационных воздействий является наиболее высоким, принято считать тензочувствительными и перспективными для проведения мониторинговых наблюдений.

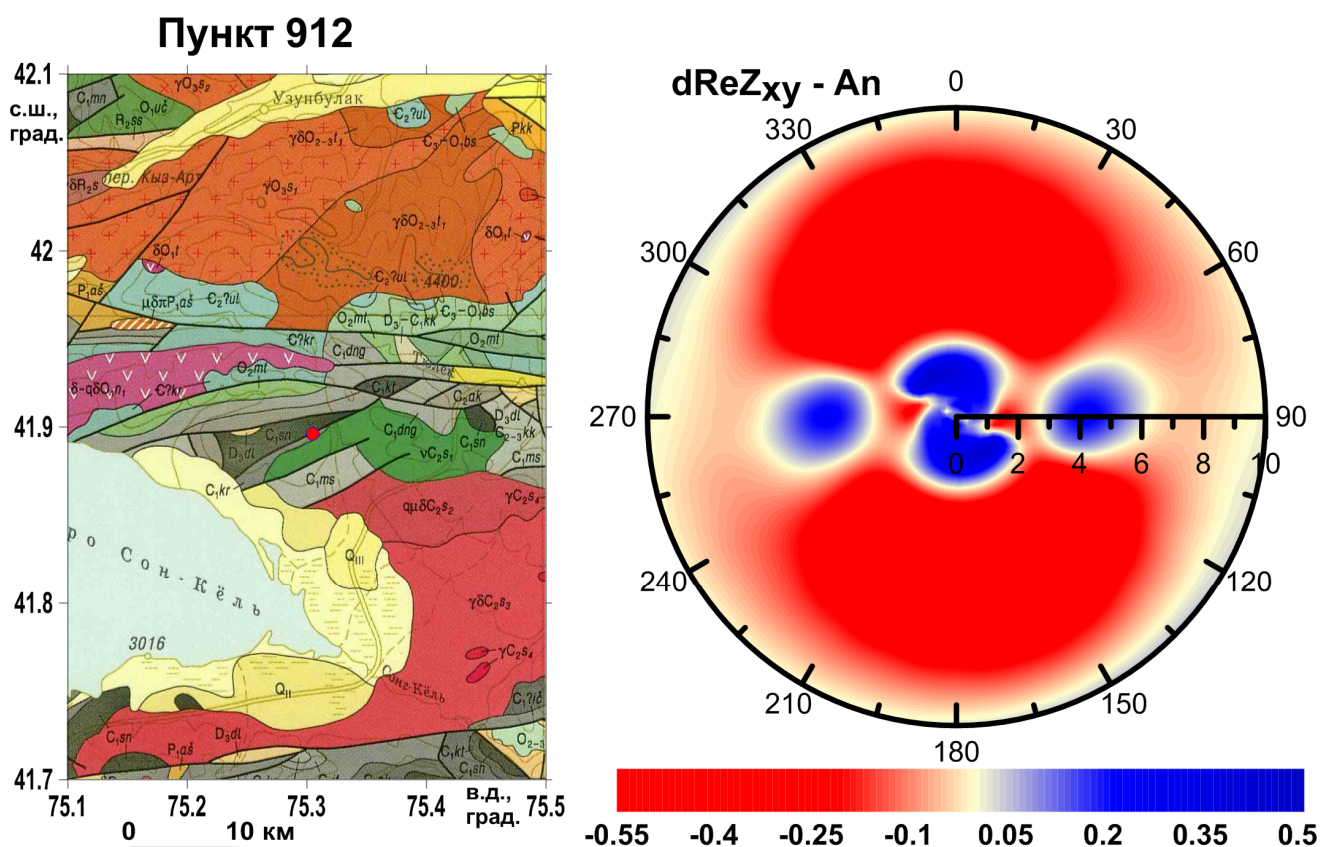


Рисунок 2.16 - Панель слева – фрагмент геологической карты вблизи расположения режимного пункта МТ-мониторинга № 912; панель справа - распределение коэффициента корреляции (основной импеданс Z_{xy} и вертикальная компонента приливных воздействий An) в полярных координатах, где по оси радиусов показан $\sqrt{T}$ (Т-период). Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции.

Особого внимания заслуживают данные, полученные на пункте режимных мониторинговых наблюдений Укок, который расположен на южном борту Кочкорской впадины. Записи магнитотеллурического поля проводились непрерывно в течении 13 дней, что позволило устойчиво определить все компоненты электромагнитного поля и проследить их динамику в корреляции с гравитационными воздействиями.

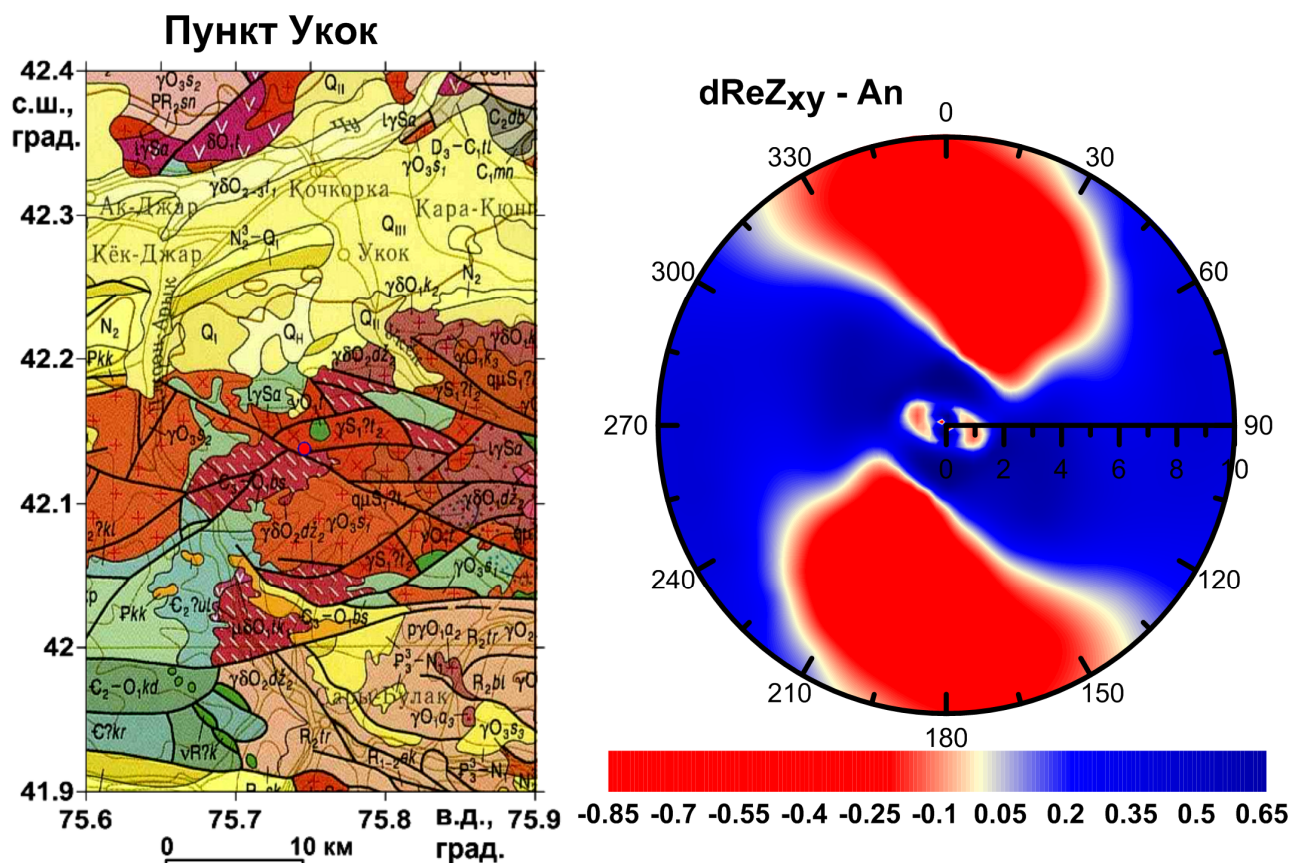


Рисунок 2.17- Панель слева – фрагмент геологической карты вблизи расположения режимного пункта МТ-мониторинга Укок; панель справа - распределение коэффициента корреляции (основной импеданс Z_{xy} и вертикальная компонента приливных воздействий A_n) в полярных координатах, где по оси радиусов показан $\sqrt{T}$ (T -период). Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции.

Вместе с тем, режимный пункт МТ-мониторинга Укок идеально подходит для использования его в качестве удаленной базы, поскольку имеет очень низкий уровень помех, а, следовательно, позволяет получить качественные данные, при этом его местонахождение интересно как с геологической точки зрения, так и для изучения поведения электромагнитных параметров, иллюстрацией чего служит рисунок 2.17.

Ключевой особенностью современной методики работ методом МТЗ являются измерения в синхронном режиме. Синхронизация записей поля чаще всего осуществляется с помощью систем GPS или ГЛОНАСС. Последующая обработка синхронных записей МТ-поля выполняется по специальным методикам. Этот подход позволяет увеличить точность и производительность наблюдений, а также получать дополнительные информативные параметры, характеризующие

геоэлектрическое строение среды. Так, в современной магнитотеллурике измерения, чаще всего, проводят методом с удаленной базой. В этом случае, базовая измерительная установка устанавливается в зоне свободной от промышленных электромагнитных помех, и измерения на ней ведутся синхронно с рядовыми точками. Такой подход позволяет при обработке исключать из получаемых в рядовых точках данных некоррелируемые с базовой станцией локальные помехи. Это связано с тем, что вариации магнитотеллурического поля (горизонтальных магнитных компонент) похожи по спектральному составу на достаточно больших расстояниях. Обычно расстояние до базовой станции составляет от 10 до 200 км в зависимости от частотного диапазона в режиме МТЗ и ГМТЗ и первые километры в режиме АМТЗ. В ряде случаев, можно использовать и несколько рабочих станций, находящихся на достаточном удалении друг от друга для выявления некоррелируемых шумов. Это возможно в связи с тем, что магнитное поле, как правило, меняется в пространстве гораздо медленнее, чем электрическое. Следовательно, синхронные наблюдения магнитного поля можно проводить на более редкой сети. Поэтому при частом шаге наблюдений на большинстве точек используют двухканальные станции для измерения только горизонтальных электрических компонент, время установки которых невелико, что также повышает производительность полевых работ. Данные о вариациях магнитного поля, в этом случае, берутся с одной общей для всех станции, в нашем случае пункт Укок, регистрирующей вариации магнитного поля.

Наибольший интерес в исследовании электромагнитных параметров вызвал тот факт, что ориентация основных тектонических нарушений, закартированных вблизи пункта зондирования, находит отражение в распределении кластеров дополнительных импедансов на корреляционных полярных диаграммах. В общей сложности было проанализировано более 10 пунктов зондирований, которые расположены в непосредственной близости от зон тектонических нарушений и все разломные структуры проявились в распределении электромагнитных параметров на полярных диаграммах.

Таким образом, обнаружена устойчивая зависимость между распределением магнитовариационных параметров и простираaniem разломных структур, что можно наблюдать на рисунках 2.14 - 2.18.

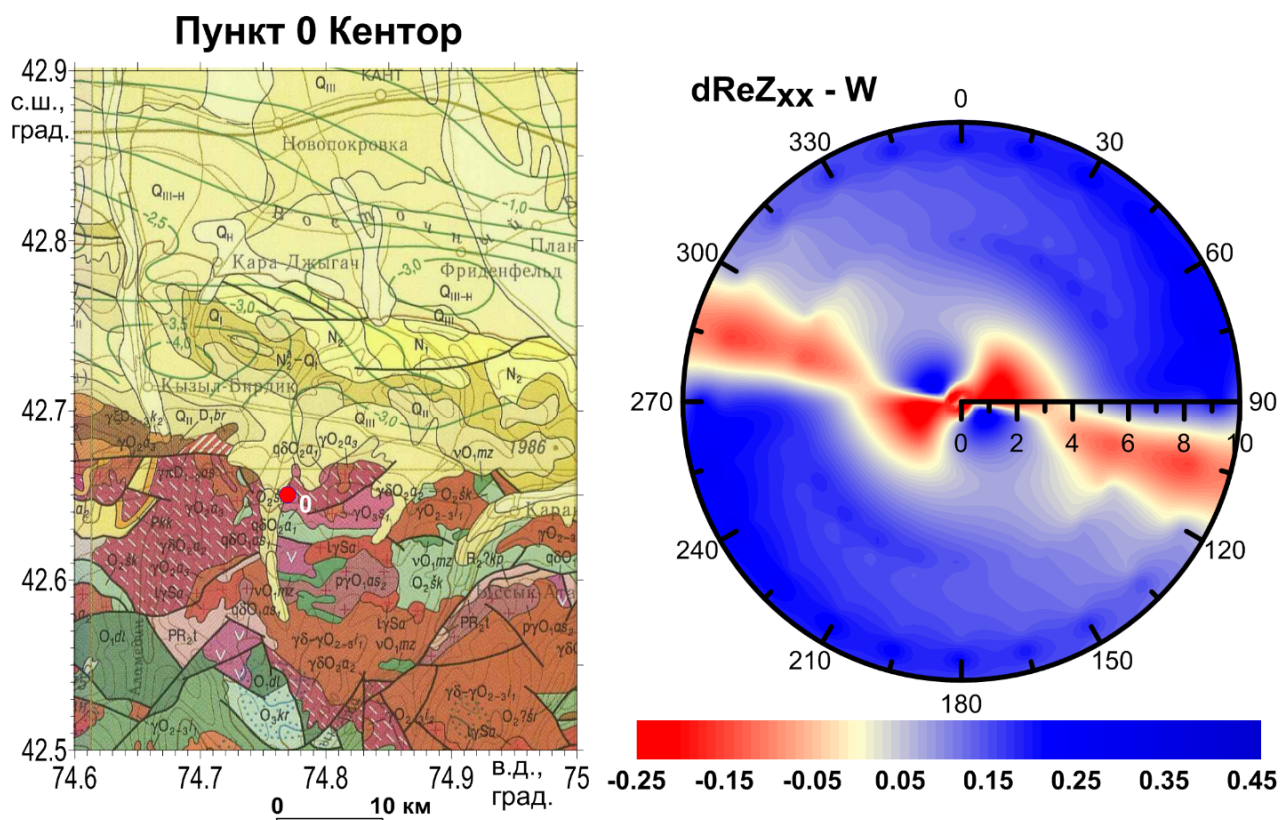


Рисунок 2.18 – Панель слева – фрагмент геологической карты вблизи расположения режимного пункта МТ-мониторинга Кентор (0); панель справа - распределение коэффициента корреляции (вектор Визе (W) и вертикальная компонента приливных воздействий A_n) в полярных координатах, где по оси радиусов показан $\sqrt{T}$ (Т-период). Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции.

Хотелось бы обратить внимание на поведение такого параметра, как типпер или вектор Визи-Паркинсона, с помощью которого возможно получить не только характеристики тензочувствительных зон, но и информацию о простирации скрытых разломных структур (рис. 2.18, 2.19).

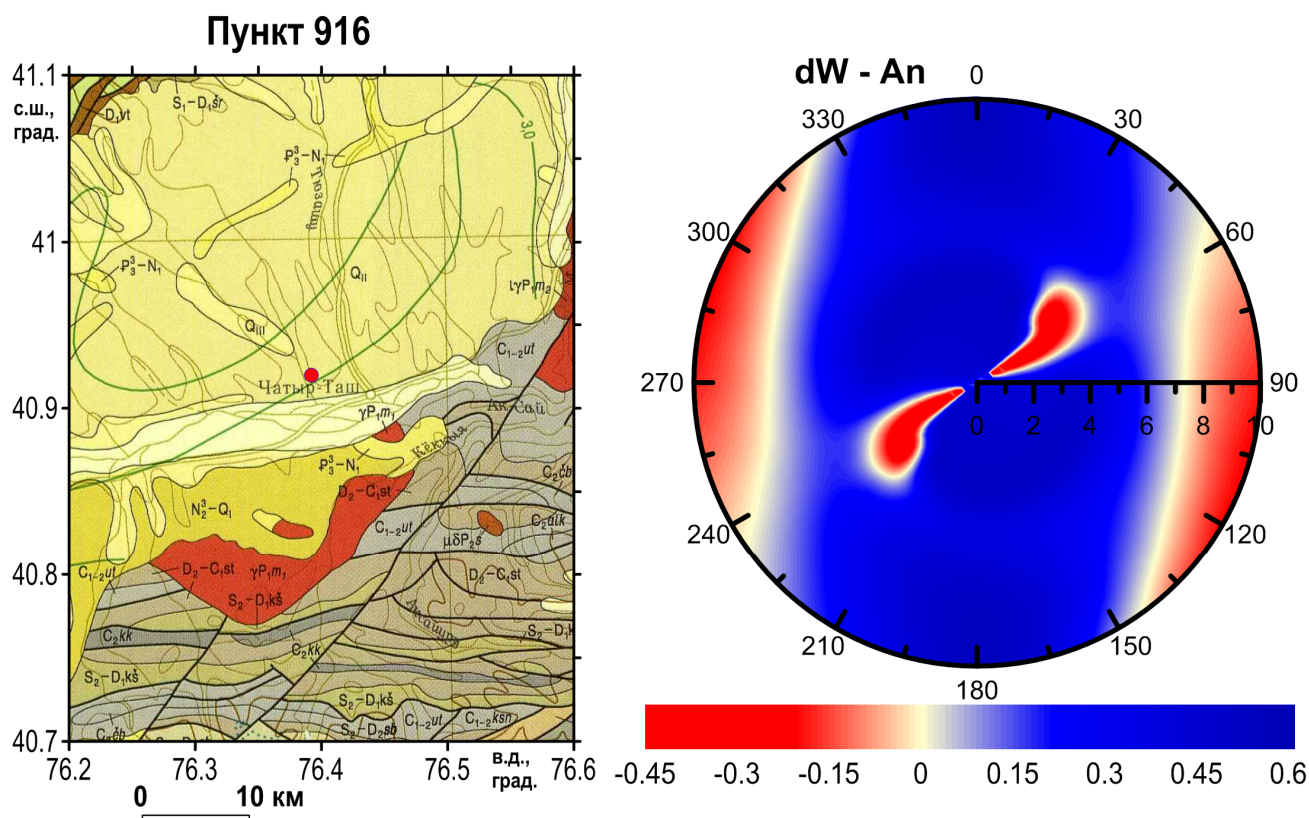


Рисунок 2.19 – Панель слева – фрагмент геологической карты вблизи расположения режимного пункта МТ-мониторинга Укок; панель справа - распределение коэффициента корреляции (вектор Визе (W) и вертикальная компонента приливных воздействий An) в полярных координатах, где по оси радиусов показан $\sqrt{T}$ (T-период). Цвет и изолинии показывают значения коэффициента корреляции.

Необходимо отметить, что в геоэлектрических построениях наиболее четко зоны тектонических нарушений проявляются до глубин порядка 20-25 километров [34-38] и особое внимание уделялось поведению электромагнитных параметров в пунктах магнитотеллурического мониторинга, приуроченных именно к активным разломным структурам. Отчасти это связано с тем, что существует предположение о тесной взаимосвязи процессов разломообразования и сейсмичности. При этом особый интерес вызывает вопрос о процессе возникновения сейсмических событий при активизации разломов и закономерностях миграции очагов землетрясений в них.

Для анализа взаимосвязи проявления сейсмических событий в изменениях кажущегося электрического сопротивления был выполнен корреляционный анализ таких параметров как вариации кажущегося сопротивления, фазы импеданса, дополнительных импедансов и магнитовариационных параметров (векторов Визе-Паркинсона). Была сформирована выборка землетрясений из каталога сети KNET (ИС РАН) и каталога Института сейсмологии НАН КР, в

которую входили сейсмические события с $K > 6$ и гипоцентральной дистанцией не более 100 км от пункта мониторинга за период с 2003-2014 гг. Для стационарного пункта МТ-мониторинга Ак-Суу установлено, что наибольший отклик в изменение кажущегося сопротивления вносят землетрясения, эпицентр которых расположен под азимутом в 57° (рис 2.20).

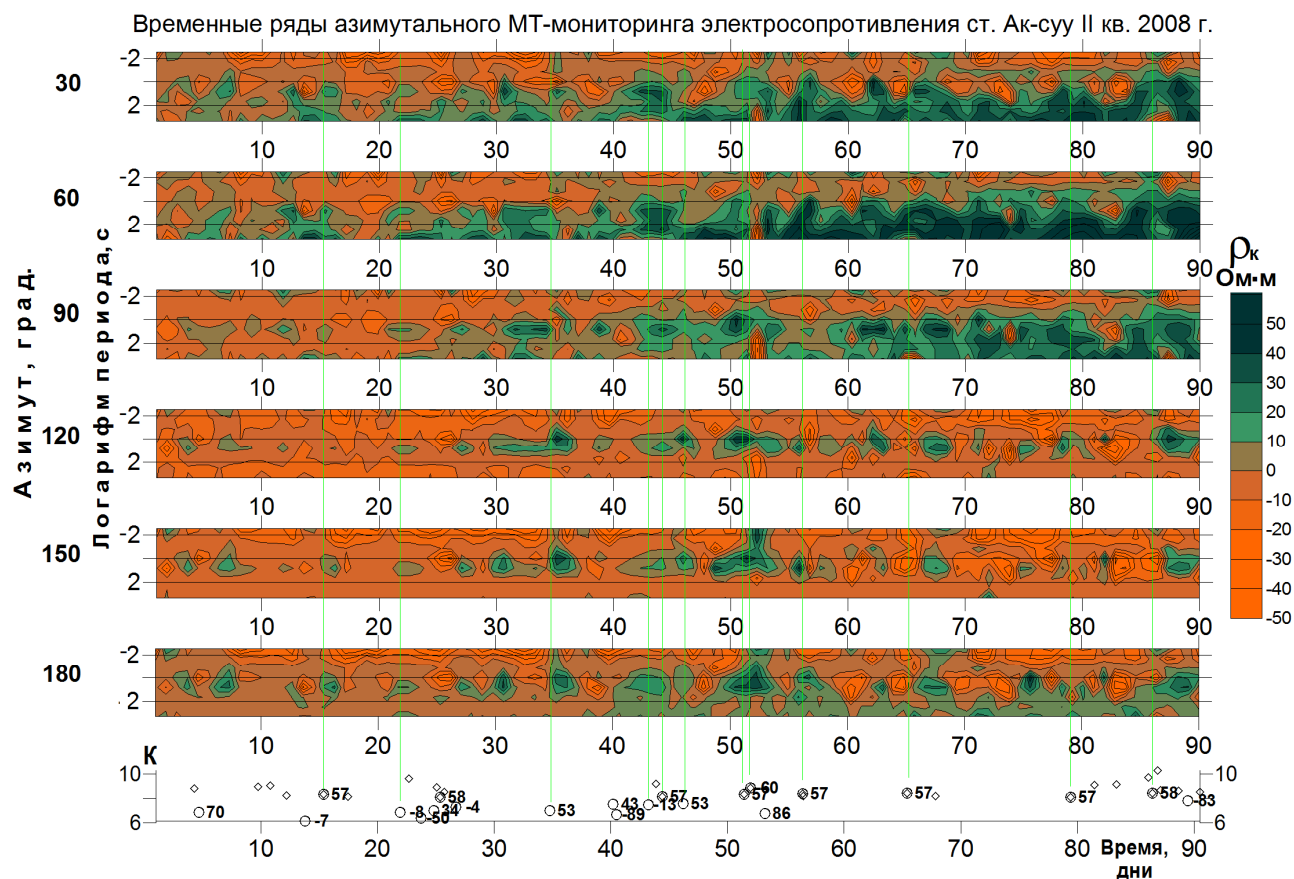


Рисунок 2.20 – Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга кажущегося сопротивления по данным станции Ак-суу в сопоставлении с сейсмичностью за апрель, май, июнь 2007 г. на территории в радиусе от станции до 100 км – (кружки) и более 100 км (ромбы).

Цифрами справа от кружков указаны азимуты от станции Ак-суу на эпицентры землетрясений.

Оценка точности выполняемых процедур производилась с использованием контрольных зондирований двумя станциями Феникс MTU-5D в одном пункте наблюдения. Электрические диполи измерительных установок были установлены параллельно друг другу со смещением 1.5 метра, синхронизация зондирований осуществлялась по GPS-часам. Среднее квадратичное отклонение от среднего вариаций кажущегося сопротивления для азимутов - 0° - 180° составляло не более 1 Ом·м (0.5%) для периодов в интервале 0.1-2.5 с и до 4 Ом·м (2%) на периодах до 100 с [38].

Выводы

Таким образом, сопоставление аномального поведения электромагнитных параметров с сейсмическим режимом БГП позволило выявить особенности аномальных изменений кажущегося электрического сопротивления и дополнительных импедансов, а также векторов Визе в зависимости от локализации гипоцентров близких землетрясений. В результате анализа гравитационных приливных воздействий и магнитотеллурических параметров, установлено, что характер взаимосвязи зависит от геоэлектрической структуры пункта зондирования и отражается в распределении устойчивых кластеров на корреляционных полярных диаграммах. Выявлено, что ориентация основных тектонических нарушений (вблизи пункта зондирования) соответствует положению кластеров на корреляционных полярных диаграммах. Выполнена оценка информативности дополнительных импедансов, на основании чего сделан вывод о необходимости использования данного параметра для оценки тензочувствительности пунктов наблюдения.

3 Разработка методического обеспечения системы обработки и анализа материалов широкодиапазонного магнитотеллурического мониторинга

3.1 Создание методики обработки и анализа временных рядов вариаций электромагнитных параметров в широком частотном диапазоне по результатам непрерывных магнитотеллурических наблюдений

Основная задача электромагнитного мониторинга, осуществляемого Научной станцией РАН заключается в поиске и развитии новых подходов к обработке и анализу временных рядов вариаций электромагнитных параметров в широком частотном диапазоне. Именно с этой целью проводились исследования взаимосвязи деформационных процессов с характеристиками вариаций геофизических полей на миниполигоне Кентор силами Научной станции РАН в 2014 году на основе данных светодальномерной сети Кентор и электромагнитных зондирований, обработанных с помощью методики азимутального магнитотеллурического мониторинга. Сеть светодальномерных наблюдений состоит из шести пунктов, с основной направленностью на изучение деформационных процессов в зоне Шамси-Тюндюкского разлома. Сеть пунктов МТ-мониторинга на территории миниполигона Кентор, состоящая из трёх точек (см. рисунок 3.1), была заложена в различных геоэлектрических условиях.

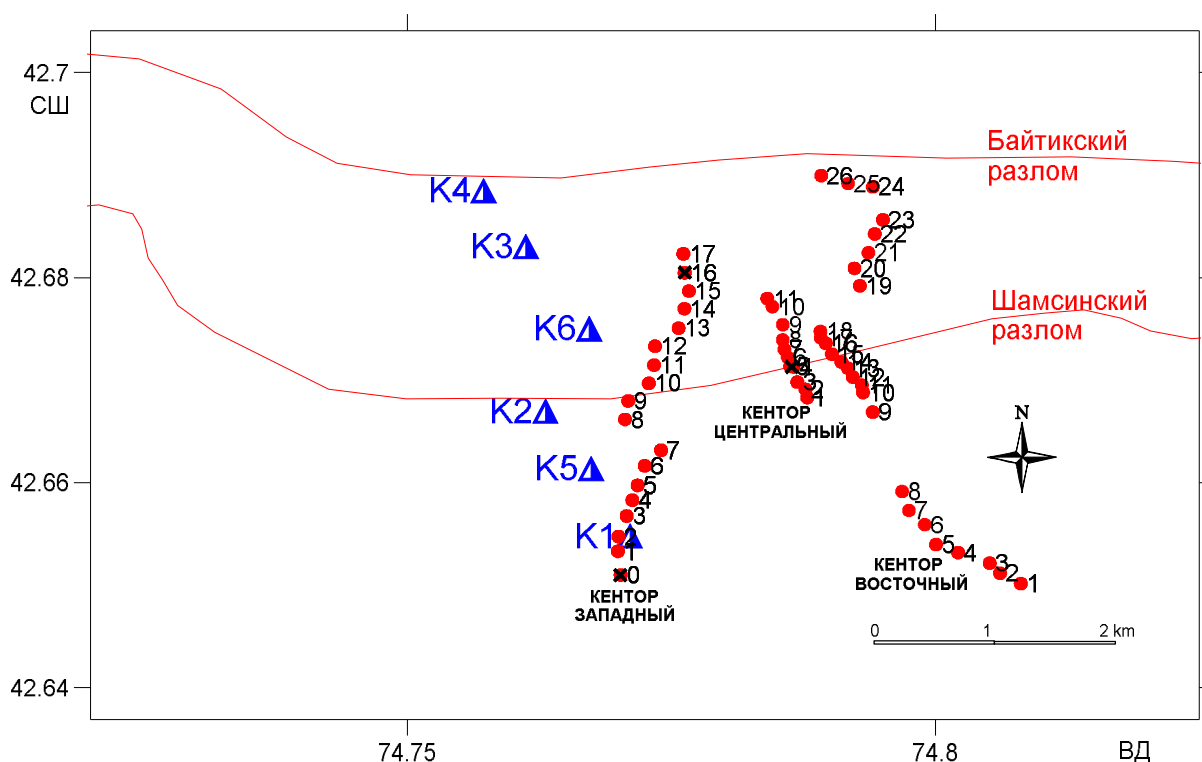


Рисунок 3.1 – Схема пунктов геофизических наблюдений на миниполигоне Кентор. МТ-зондирования показаны красными кружками, крестиками помечены пункты мониторинговых наблюдений, пункты светодальномерных наблюдений показаны треугольниками

Пункт «0» на профиле Кентор Западный расположен на северном склоне Киргизского хребта на палеозойских породах, перекрытых конусом выноса, пункт «4» на профиле Кентор Центральный находится непосредственно над зоной Шамси-Тюндюкского разлома, а пункт «16» на профиле Кентор Западный расположен на неоген-четвертичных отложениях Чуйской впадины.

Уровень кажущегося сопротивления в верхней части разреза для пункта «0» на профиле Кентор Западный в интервале периодов 0.01-1 с по продольной кривой кажущегося сопротивления составляет 350-150 Ом·м. Такие значения кажущегося сопротивления могут свидетельствовать о некоторой трещиноватости верхней части разреза и о присутствии в нём воды и, соответственно, возможен процесс перераспределения поровых жидкостей в порово-трещинном пространстве горных пород при их деформировании [41]. На рисунке 3.2 показаны кривые кажущегося сопротивления с пункта «0» на профиле Кентор Западный.

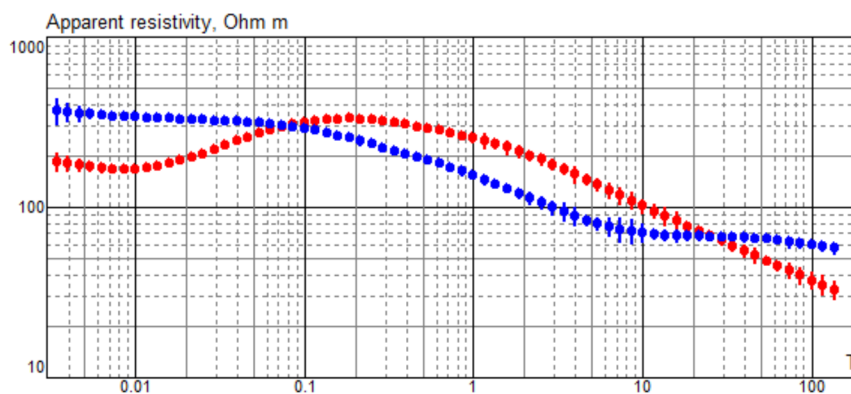


Рисунок 3.2 – Кривые кажущегося сопротивления с пункта «0» на профиле Кентор Западный.

Синим цветом показана продольная кривая, красным - поперечная

Особое внимание уделялось поведению частотно-временных рядов вариаций МТ-параметров на пункте «4» профиля Кентор Центральный. Пункт «4» расположен непосредственно над зоной Шамси-Тюндюкского разлома, перекрытой первыми сотнями метров четвертичных отложений. Уровень кажущегося сопротивления в верхней части разреза для пункта «4» на профиле Кентор Центральный в интервале периодов 0.01-1 с по продольной кривой кажущегося сопротивления составляет 170-80 Ом·м. Такие значения кажущегося сопротивления могут свидетельствовать о значительной пористости и водонасыщенности верхней части разреза и указывать на возможность процессов перераспределения поровых жидкостей в порово-трещинном пространстве горных пород при их деформировании [42]. На рисунке 3.3 показаны кривые кажущегося сопротивления с пункта «4» на профиле Кентор Центральный. Интересным моментом

является то обстоятельство, что на кривых МТЗ пунктах «4» и «16» (рис.3.4) очень ярко проявляется гальванический эффект от зоны сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта, в то время как на пункте «0» он полностью отсутствует.

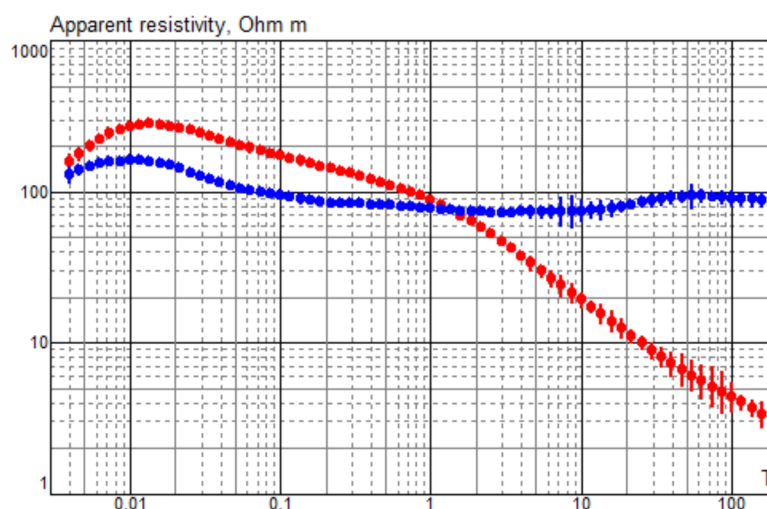


Рисунок 3.3 – Кривые кажущегося сопротивления с пункта «4» на профиле Кентор Центральный.

Синим показана продольная кривая, красным поперечная

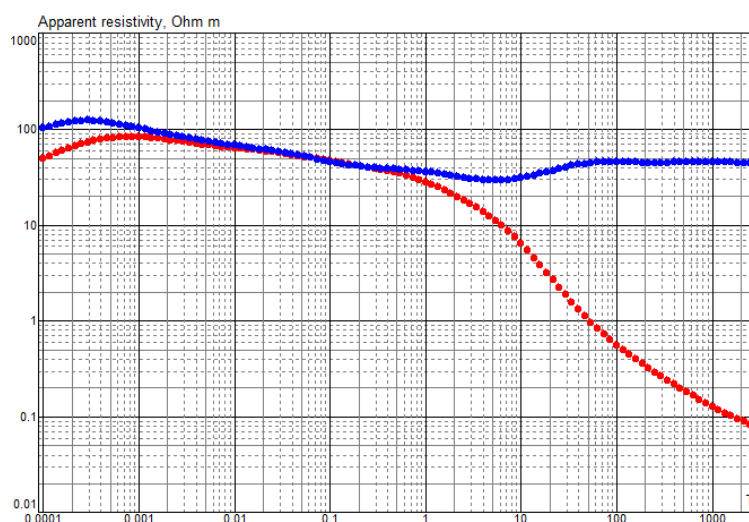


Рисунок 3.4 – Кривые кажущегося сопротивления с пункта «16» на профиле Кентор Центральный.

Синим показана продольная кривая, красным поперечная

В 2015 году был продолжен анализ частотно-временных рядов данных МТ-мониторинга на стационарных пунктах (пункты «0», «4» и «16») миниполигона Кентор, построенных по методике азимутального мониторинга. Поскольку, представление результатов МТ-мониторинга в виде частотно-временных рядов по 12-ти азимутам с возможностью сопоставления поведения вариаций кажущегося сопротивления, фазы импеданса и типпера является новым инструментом для анализа

мониторинговых данных, в рамках данного отчета проанализирован материал не только 2014-2015 гг., но и записи, выполненные при проведении промышленного Камбаратинского взрыва. Особенно информативно в этой связи распределение частотно-временных особенностей вариаций МТ-параметров в зависимости от азимута. В случае сходной картины распределения данных на частотно-временных рядах различных магнитотеллурических параметров этот способ позволяет подтвердить их качество и надёжность. В виду того, что именно на пункте «Камбарата» была обнаружена ярко выраженная взаимосвязь между изменением кажущегося сопротивления и сейсмическими воздействиями, представляется возможным рассмотреть все электромагнитные параметры, имеющиеся в нашем распоряжении на предмет выявления наиболее информативного параметра.

На рисунке 3.5 представлены частотно-временные ряды азимутального магнитотеллурического (МТ) мониторинга кажущегося сопротивления пункта «Камбарата». Длительность краткосрочных записей в пунктах МТ-мониторинга, расположенных в Центральном Тянь-Шане, как правило, составляет трое суток, а регистрация МТ-процесса в стационарных пунктах производится непрерывно. Обработка МТ-реализаций с целью определения частотных зависимостей компонент тензора импеданса и матрицы Визе – Паркинсона выполнялась с помощью программного пакета SSMT2000 и МТ-Corrector. Для формирования краткосрочных частотно-временных рядов электромагнитных параметров среды с шагом по времени один час из трехсуточных МТ-реализаций производилась обработка последовательных непересекающихся МТ-реализаций с часовой длительностью. Полученные частотно-временные ряды более наглядны и удобны для анализа, если рассматривать не абсолютные значения, а вариации ЭМ-параметров, т.е. их отклонения от средних значений, вычисленных для каждого азимута и каждого периода зондирования.

Для сопоставления частотно-временных рядов с лунно-солнечными приливными воздействиями достаточна дискретизация один час. В то же время величина шага по времени частотно-временных рядов МТ-мониторинга накладывает ограничения на предел частотного диапазона зондирований в сторону низких частот. Обычно при обработке МТ-реализаций длительностью около 3600 с компоненты тензора импеданса и матрицы Визе – Паркинсона устойчиво определяются на периодах до 100 с. Эффективная глубина проникновения поля для таких частот может составлять около двадцати километров, что достаточно для мониторинга параметров сейсмогенерирующего слоя в условиях Центрального Тянь-Шаня. Верхний предел частотного диапазона в основном определяется настройками станции Phoenix MTU-5D и по итогам обработки ограничен на уровне 50 - 80 Гц. Презентация краткосрочных частотно-временных рядов производится в интервале частот, где наблюдаются значимые вариации электромагнитных

параметров, предположительно связанные с тензочувствительными (трещиноватыми и водонасыщенными) зонами в верхней части разреза. Обычно это диапазон 10 Гц - 0.1 Гц. Частота дискретизации частотно-временных рядов для стационарных пунктов МТ-мониторинга с непрерывной записью составляет одни сутки, а диапазон периодов зондирования 0.01с – 1800 с, хотя формат записи позволяет построение и краткосрочных частотно-временных рядов. Глубинность таких зондирований значительно больше, что обеспечивает мониторинг электропроводности в интервале глубин корового проводящего слоя (30-55 км). Эти частотно-временные ряды являются долгосрочными, и их длительность в НС РАН составляет более 12 лет.

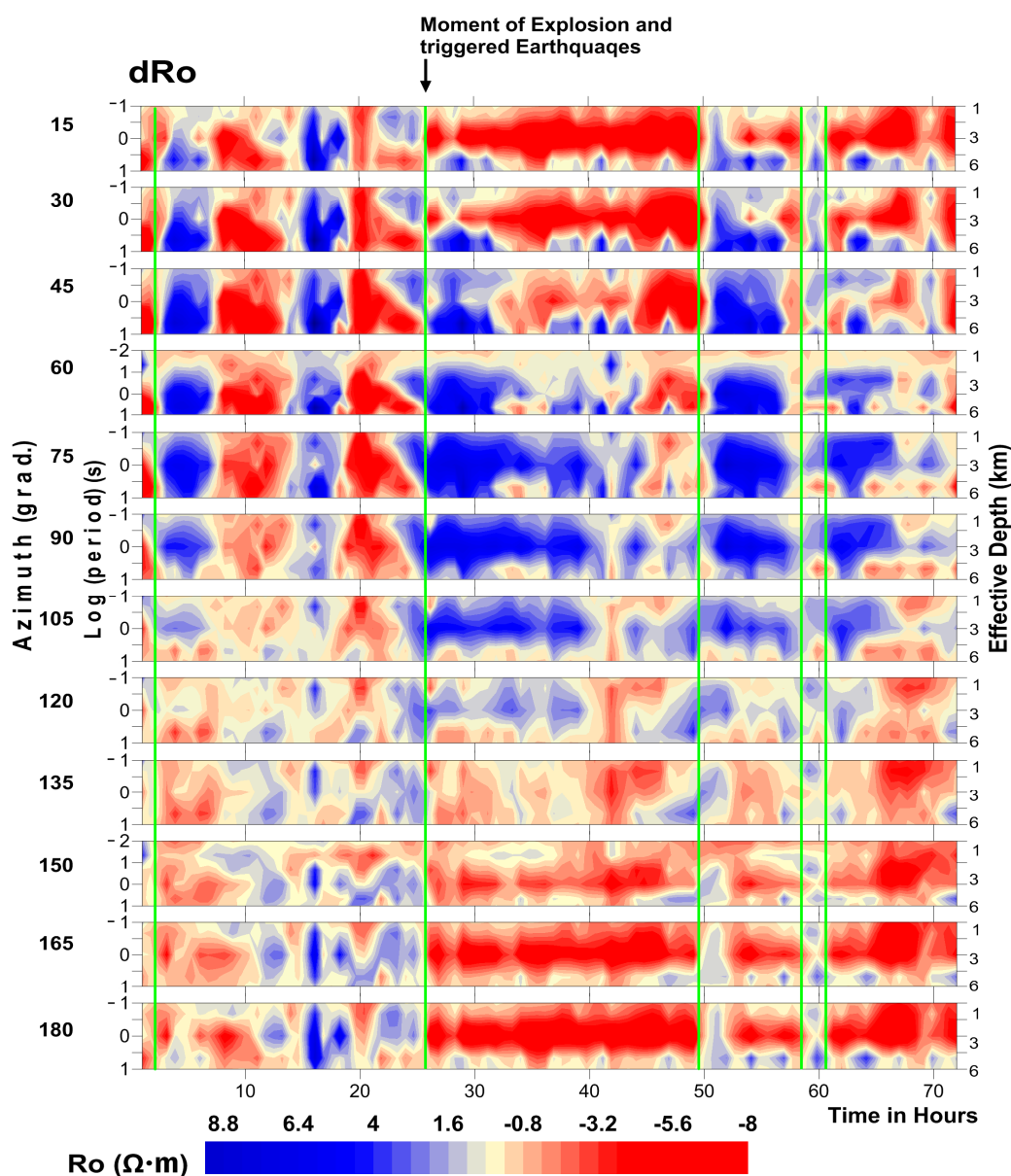


Рисунок 3.5 – Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций кажущегося сопротивления пункта «Камбарата» в сопоставлении с сейсмичностью. Моменты землетрясений показаны зелеными линиями

При азимутальном МТ-мониторинге вариации электромагнитных параметров среды представляются в виде частотно-временных рядов по азимутам от 0° до 180° . При этом, на одном рисунке представлена информация о зависимости амплитуды вариаций ЭМ-параметров как от периода и азимута, так и от времени. На рисунке 3.6, показаны частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга фазы импеданса в сопоставлении с сейсмичностью для полевого эксперимента, связанного с Камбаратинским промышленным взрывом (2.8 Кт в тротиловом эквиваленте) 22 декабря 2009 г UT 5h 54' 33.66".

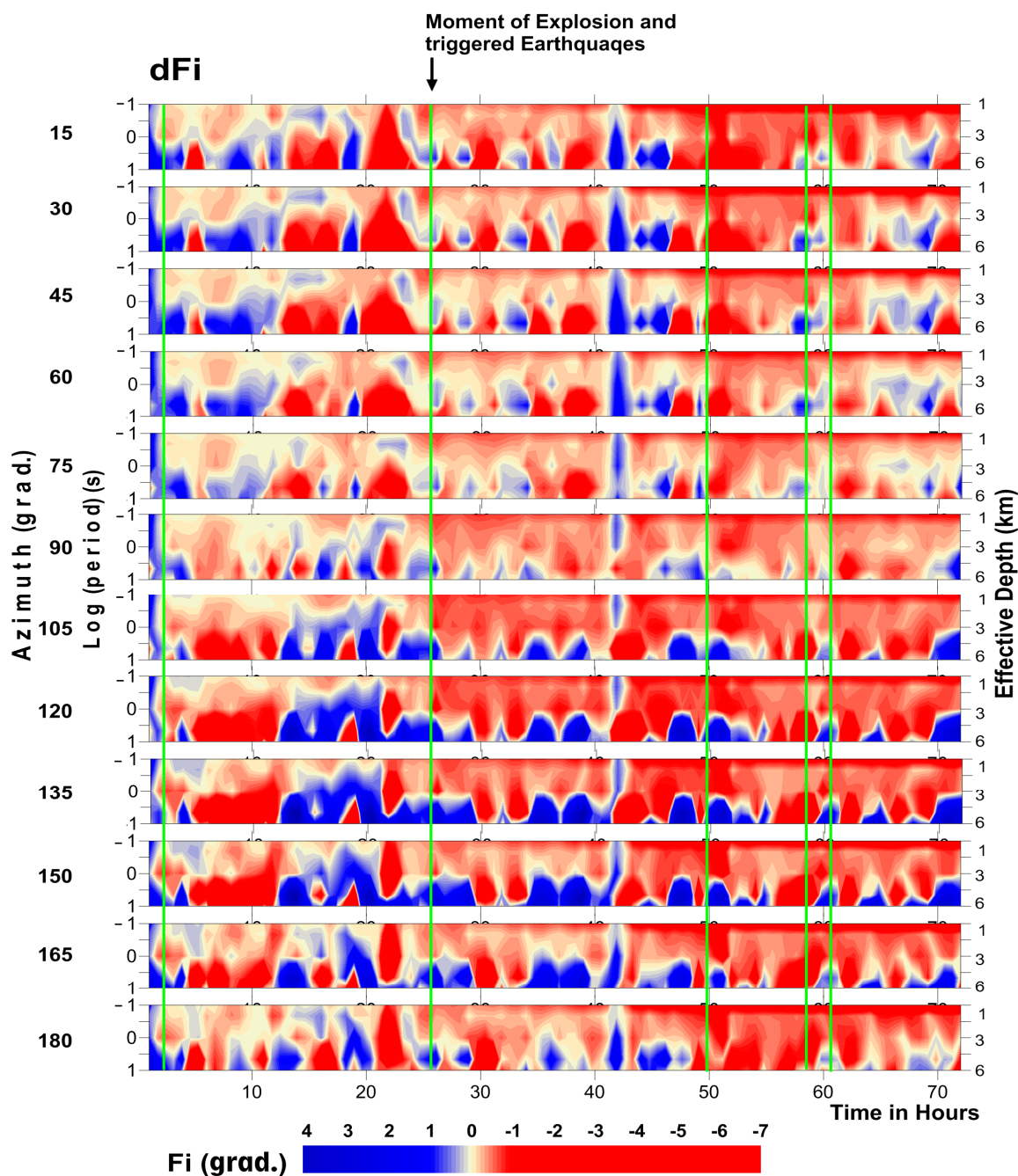


Рисунок 3.6 – Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций фаз импеданса пункта «Камбарата» в сопоставлении с сейсмичностью. Моменты землетрясений показаны зелеными линиями

Данные, полученные в результате проведенных сейсмических наблюдений, позволили установить наличие обусловленных взрывом подвижек по разлому, прилегающему к пункту взрыва, а также зафиксировать через 12 с после взрыва серию наведенных слабых сейсмических событий на расстоянии от пункта взрыва около 16 км.

Наиболее яркая взаимосвязь вариаций кажущегося сопротивления и сейсмических событий наблюдается для азимутов 15° , 150° , 165° и 180° . Вариации имеют одну тенденцию (возрастание или убывание) для всех азимутов. Такой характер вариаций может быть интерпретирован либо влиянием электромагнитных помех, отражающихся на всех азимутах, либо в рамках гипотезы [42] о перераспределении поровых жидкостей в порово-трещинном пространстве - перемещением поровых жидкостей в вертикальном направлении. Оба этих варианта должны быть либо подтверждены, либо опровергнуты дополнительной информацией. В данном случае более вероятной является вторая причина, т.к. наблюдаемый в районе Камбараты уровень промышленных электромагнитных помех низок и регистрация компонент МТ-поля осуществлялась в благоприятных условиях. Аномальные изменения для указанных азимутов частотно-временных рядов азимутального МТ-мониторинга соответствуют гипотезе [40] о перераспределении поровых жидкостей в порово-трещинном пространстве, что морфологически выражается в ортогональности азимутов, на которых происходят вариации уменьшения и увеличения кажущегося сопротивления. Для удобства дальнейшего изложения такие вариации будем называть «когерентными по азимутам». Стоит отметить, что в случае пункта «Камбарата» изменения кажущегося сопротивления в сопоставлении с сейсмическими событиями проявились ярче, чем вариации фаз импеданса, хотя принято считать, что последние более устойчивы к влиянию приповерхностных неоднородностей.

Зелеными линиями на рисунках 3.5 - 3.10 показаны моменты взрыва и землетрясений, в том числе и инициированных промышленным взрывом. Энергетический класс данных сейсмических событий невелик, но с учётом расстояний, значительных деформационных процессов и, соответственно, наблюдаются интенсивные вариации кажущегося сопротивления в указанные моменты времени.

Для анализа взаимосвязи изменений электромагнитных параметров и напряженно-деформированного состояния среды было решено проанализировать частотно-временные ряды, обработанные по методике азимутального МТ-мониторинга, как вариаций реальной части основного импеданса пункта «Камбарата» в сопоставлении с сейсмичностью, так и мнимой - рисунки 3.7 и 3.8. Мнимая часть основного импеданса, на наш взгляд, более информативна, взаимосвязь вариаций и сейсмических событий наиболее четко проявлена на азимутах 135° , 150° , 165° , 180° и 15° .

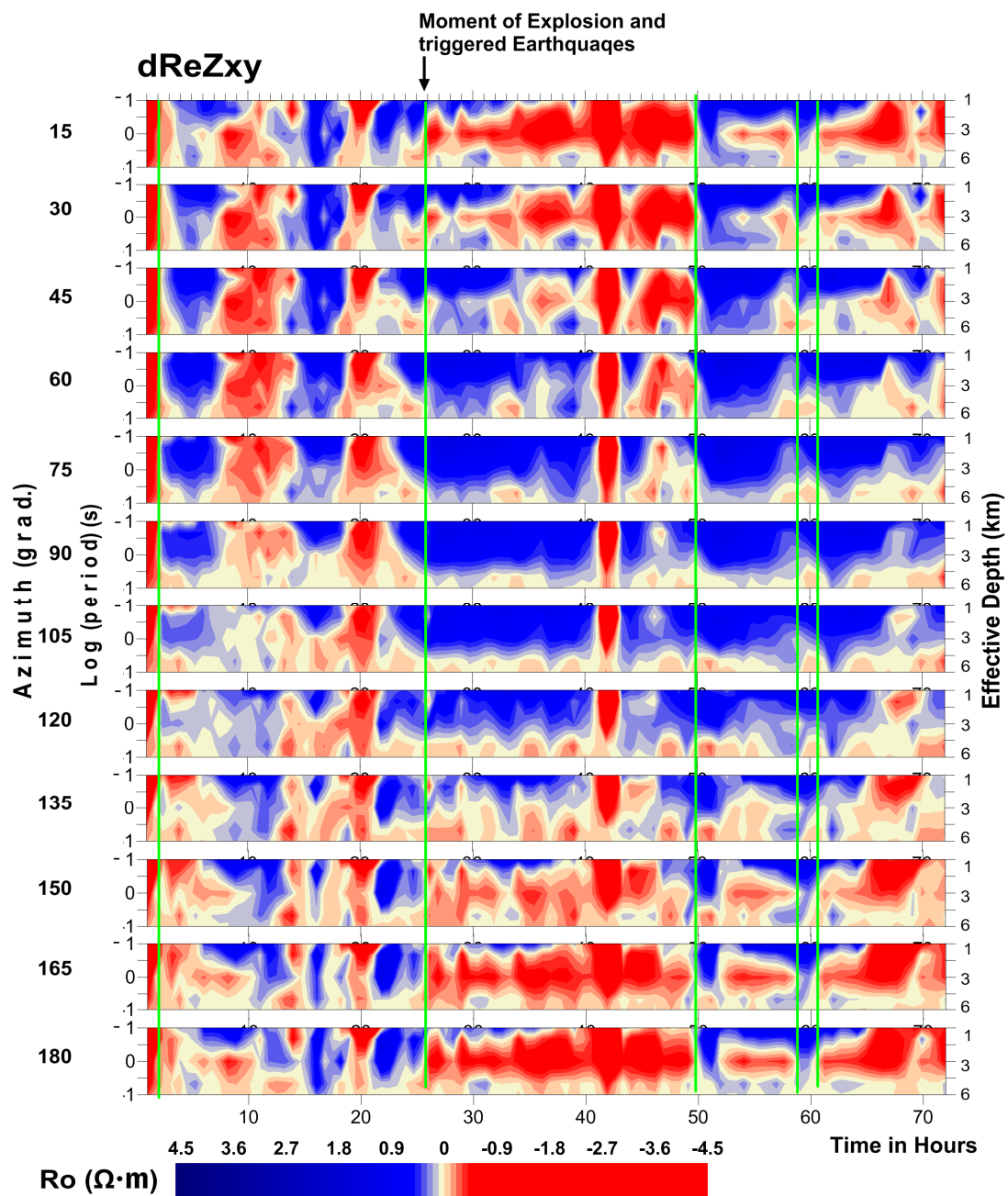


Рисунок 3.7 – Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций реальной части основного импеданса пункта «Камбарата» в сопоставлении с сейсмичностью. Моменты землетрясений показаны зелеными линиями

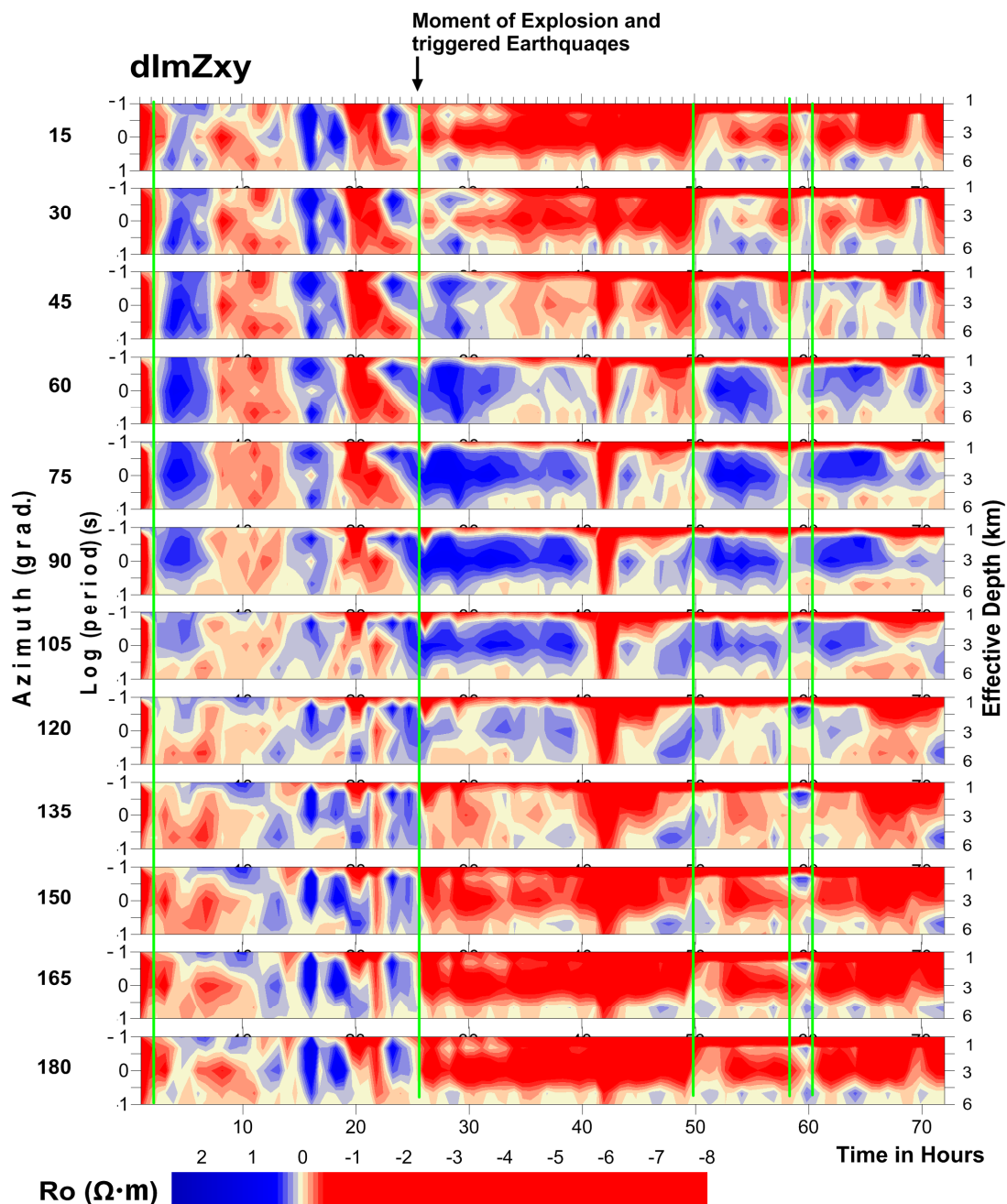


Рисунок 3.8 – Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций мнимой части основного импеданса пункта «Камбарата» в сопоставлении с сейсмичностью. Моменты землетрясений показаны зелеными линиями

Особенно интересными являются изменения во времени дополнительного импеданса, характеризующего степень неоднородности (трёхмерности) среды. На частотно-временных рядах ReZ_{xx} и ImZ_{xx} , представленных на рисунках 3.9 и 3.10, наблюдаются вариации, связанные с деформационными процессами, сопутствующими сейсмическим событиям. Поведение вариаций электромагнитных параметров во времени в зависимости от частоты и азимута регистрации имеет сложный характер и зависит от степени присутствия в общем деформационном процессе сейсмотектонических деформаций, периодических лунно-солнечных приливов и других факторов.

Эти деформации через некоторые механизмы взаимосвязи [Брагин, XXX] отражаются в ЧВР вариаций электромагнитных параметров. Анализ и сопоставление частотно-временных рядов вариаций электромагнитных параметров, имеющих различную природу (изменения активного и реактивного сопротивления) позволит пролить свет на указанные механизмы взаимосвязи с деформационными процессами, и могут быть использованы для оценки их чувствительности. Основные же особенности указанных рядов достаточно схожи.

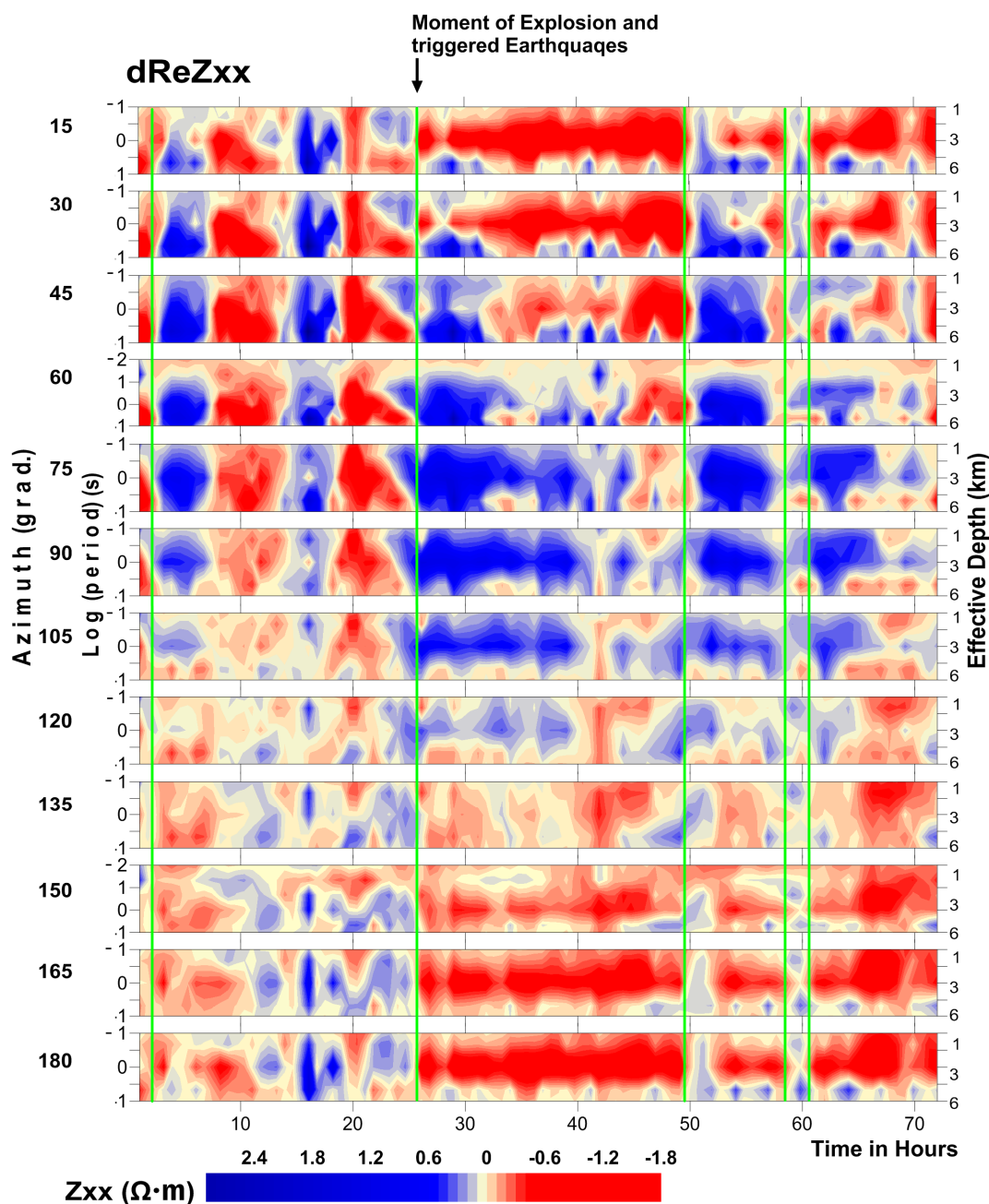


Рисунок 3.9 – Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга вариаций реальной части дополнительного импеданса пункта «Камбарата» в сопоставлении с сейсмичностью.

Моменты землетрясений показаны зелеными линиями

Выводы

В основу разработки методического обеспечения системы обработки и анализа материалов широкодиапазонного магнитотеллурического мониторинга был положен всесторонний анализ частотно-временных рядов всех электромагнитных параметров.

Дальнейшее развитие методики обработки и анализа временных рядов вариаций электромагнитных параметров в широком частотном диапазоне по результатам непрерывных магнитотеллурических наблюдений осуществлялось на основе результатов электромагнитных зондирований, полученных при проведении Камбаратинского промышленного взрыва.

Данные азимутального МТ-мониторинга электромагнитных параметров, представленные в виде частотно-временных рядов кажущегося сопротивления, фазы импеданса, реальной и мнимой частей основных и дополнительных импедансов, а также типпера (R_o , ϕ , ReZ_{xy} , ImZ_{xy} , ReZ_{xx} , ImZ_{xx} , W), позволяют оценивать вариации электрических характеристик среды в окрестности пункта мониторинга.

Контроль надёжности частотно-временных рядов азимутального МТ-мониторинга осуществляется посредством сопоставления и анализа различных видов данных между собой и в корреляции с приливными воздействиями.

Выполненный анализ свидетельствует в пользу высокой информативности таких электромагнитных параметров как реальной и мнимой частей основных и дополнительных импедансов, а также типпера.

4 Продолжение экспериментального изучения динамики электромагнитных параметров в широком частотном диапазоне по данным непрерывных магнитотеллурических измерений

4.1 Дополнение базы данных временных рядов вариаций электромагнитных параметров новыми результатами мониторинговых магнитотеллурических наблюдений

Базы геофизических данных, разработанные в Научной станции РАН, представляют собой не только ценный информационный ресурс в области геоэлектрики, сейсмологии, магнитометрии, GPS-наблюдений и т.д., но и демонстрируют на практике методы создания геофизических архивов с удаленным доступом через Интернет, переводя доступ к геофизическим данным на качественно новый уровень. Имея лишь компьютер, подсоединенный к сети Интернет, и доступ в локальную сеть Научной станции РАН, любой научный сотрудник может не только искать и загружать себе необходимые данные, но и интерактивно визуализировать их, строить геофизические модели, подгружать новые данные в существующую базу. Экспериментальная основа базы магнитотеллурических данных - материалы наблюдений, выполненных в течение 2003-2015 г. на территории Бишкекского геодинамического полигона на двух стационарных мониторинговых пунктах – Ак-Суу и Чон-Курчак, где проводились магнитотеллурические зондирования и в 2015 г. с помощью станций Phoenix MTU - 5.

Измерительная установка с использованием MTU-5 состоит из трех индукционных датчиков, используемых для регистрации компонент магнитного поля – H_x , H_y , H_z , и двух взаимно перпендикулярных измерительных линий (диполей), длиной 50 м, являющихся датчиками электрического поля E_x и E_y . Использовалась стационарная электродная система - специальные неполяризующиеся электроды, состоящие из угольного стержня, помещенного в спрессованный порошок марганцево-угольной смеси [33], разработанная в Научной станции РАН (патент на полезную модель RU 123979 U1) обеспечивающая возможность мониторинга кажущегося сопротивления станциями Phoenix MTU - 5. Продолжительность большинства полученных реализаций на стационарных мониторинговых пунктах составила около 16 часов непрерывных записей в сутки.

Основными электромагнитными характеристиками, входящими в базу данных, являются параметры естественного электромагнитного поля, такие как реальные и мнимые компоненты тензора импеданса и типпер, которые используются для вычисления трансформант - кажущегося сопротивления, фазы импеданса и т.д. Необходимо отметить, что кажущееся сопротивление на указанных стационарных мониторинговых пунктах измеряется различными электромагнитными методами (с естественным и контролируемым источником), что позволяет осуществлять дополнительную верификацию полученных данных.

Отличительной особенностью магнитотеллурических исследований 2015 года является дополнение мониторинговых наблюдений на полигоне Кентор, расположенном в окрестности активного Шамси-Тюндюкского разлома, который залегает в центральной части Бишкекского геодинамического полигона на северном склоне Киргизского хребта на абсолютной высоте около 1800 м, в нескольких километрах от места нахождения Научной станции РАН, данными профильного мониторинга. Сеть пунктов МТ-мониторинга на территории миниполигона Кентор состоит из трёх стационарных пунктов наблюдений. Она была заложена в различных геоэлектрических условиях с целью наблюдения за вариациями электромагнитных параметров среды в связи с деформационными процессами, происходящими в зоне активного Шамси-Тюндюкского разлома. Пункт «0» на профиле Кентор Западный расположен на северном склоне Киргизского хребта на палеозойских породах, перекрытых конусом выноса, пункт «4» на профиле Кентор Центральный расположен непосредственно над зоной Шамси-Тюндюкского разлома, а пункт «16» на профиле Кентор Западный расположен на отложениях Чуйской впадины. Наблюдения не являлись непрерывными, а выполнялись несколькими сессиями различной длительности в комплексе со светодальномерными измерениями. Такой подход позволил: а) определить распределение электрических свойств в геоэлектрической модели миниполигона и проводить их мониторинг; б) получить характеристики деформационного процесса в зоне активного разлома; в) выполнить оценки корреляционных связей вариаций различных геофизических полей с параметрами лунно-солнечных приливных воздействий. В 2015 году были выполнены две сессии профильного мониторинга (весенняя и осенняя) длительностью по 20 дней.

Таким образом, база данных временных рядов вариаций электромагнитных параметров была дополнена новыми результатами мониторинговых магнитотеллурических наблюдений, полученными в 2015 году на стационарных мониторинговых пунктах Аксуу и Чон-Курчак, данными режимных наблюдений миниполигона Кентор, а также результатами профильных магнитотеллурических наблюдений.

4.2 Оценки корреляционных связей вариаций геофизических полей с параметрами лунно-солнечных приливных деформаций

В исследованиях, связанных с развитием принципиально новой методики азимутального магнитотеллурического мониторинга, рассматривались временные ряды вариаций (отклонения от среднего) для электромагнитных параметров среды по азимутам 0° - 180° в зависимости от периода зондирования [34-38]. Такой формат представления данных обеспечивал рассмотрение на одном графике зависимостей вариаций компонент тензора импеданса сразу от трёх параметров - времени, периода зондирования и азимута. Корреляционные связи между приливными воздействиями и

изменениями электромагнитных параметров, которые служат критерием оценки тензочувствительности пункта зондирования, представлялись в виде прямоугольных диаграмм распределения коэффициентов корреляции (r) в зависимости от периода МТ-зондирования и азимута [5-9]. Корреляционные зависимости между временными рядами «х» и «у» вычислялись по формуле (4.1):

$$r = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n}}{\sqrt{\left(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}\right) \cdot \left(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}\right)}} \quad (4.1)$$

Оценка точности выполняемых процедур производилась с использованием контрольных зондирований двумя станциями Феникс MTU-5D в одном пункте наблюдения. Электрические диполи измерительных установок были установлены параллельно друг другу со смещением 1.5 метра, синхронизация зондирований осуществлялась по GPS-часам. Среднее квадратичное отклонение от среднего вариаций кажущегося сопротивления для азимутов - 0° - 180° составляло не более 1 Ом·м (0.5%) для периодов в интервале 0.1-2.5 с и до 4 Ом·м (2%) на периодах до 100 с [34].

Результаты корреляционного анализа представлены в виде полярных диаграмм (рис.4.1 б, в), где ось азимутов соответствует углу пересчета компонент тензора импеданса, по оси радиусов откладывается корень из периода МТ-зондирования, значения коэффициентов корреляции обозначены цветом. Для оценки тензочувствительности участков мини-полигона Кентор рассматривались корреляционные диаграммы следующих временных рядов: вариаций кажущегося сопротивления, фаз импеданса, компонент тензора импеданса (ReZ_{xx} , ImZ_{xx} , ReZ_{xy} , ImZ_{xy}) в сопоставлении с временными рядами лунно-солнечных приливов и изменениями длин базовых линий (рис. 4.1). Формирование указанных временных рядов вариаций МТ-параметров производилось по следующей схеме: 1) обработка записей МТЗ с помощью программы SSMT-2000 (Phoenix Geophysics) и вычисление значений частотных зависимостей тензора импеданса для 48 непересекающихся часовых интервалов в диапазоне периодов от 0.01 до 100 с (общая длительность МТ-записи на мини-полигоне Кентор - двое суток); 2) пересчёт значений тензора импеданса на сетку азимутов через 15 градусов. В результате полученный массив экспериментальных данных включал в себя значения компонент тензора импеданса для 48 интервалов длительностью по одному часу в диапазоне периодов от 0.01 до 100 с и диапазоне азимутов – от 0° до 360° . Временная

динамика вариаций МТ-параметров, вычисленных для всей совокупности периодов и азимутов, представляет наибольший интерес в данной работе.

На рисунке 4.1 представлена схема расположения пунктов мониторинга мини-полигона Кентор. На том же рисунке, в качестве примера, приведены диаграммы корреляции вариаций кажущегося сопротивления (dRo) в интервале периодов от 0.01 до 100 секунд с северной компонентой лунно-солнечных приливных воздействий (Av), рассчитанной с помощью программы «Tide.exe» в пункте ФТ-0, и изменениями длин базовых линий между пунктами К5 и К2, полученными по результатам светодальномерных наблюдений. Распределения описанных выше коэффициентов корреляции в полярных координатах имеют схожий характер при относительно небольших значениях 0.35-0.5.

На корреляционных полярных диаграммах рисунка 4.1 выделяются области (кластеры) устойчивой корреляции, которые являются интегральной мерой взаимосвязи вариаций электромагнитных параметров с приливными воздействиями и изменениями длин базовых линий. Морфология и расположение кластеров (без учёта знака) дают дополнительную характеристику деформационного процесса, проявления которого связаны с рассматриваемыми вариациями физических параметров геосреды. Так, результаты магнитотеллурического мониторинга для пунктов, расположенных в различных геолого-тектонических условиях в межгорных впадинах Тянь-Шаня (Кочкорской, Нарынской, Аксайской) и вблизи зоны Таласо-Ферганского разлома, свидетельствуют о том, что положение кластеров на корреляционных полярных диаграммах связано с геоэлектрической структурой пункта наблюдения и соответствует ориентации основных тектонических элементов вблизи этого пункта.

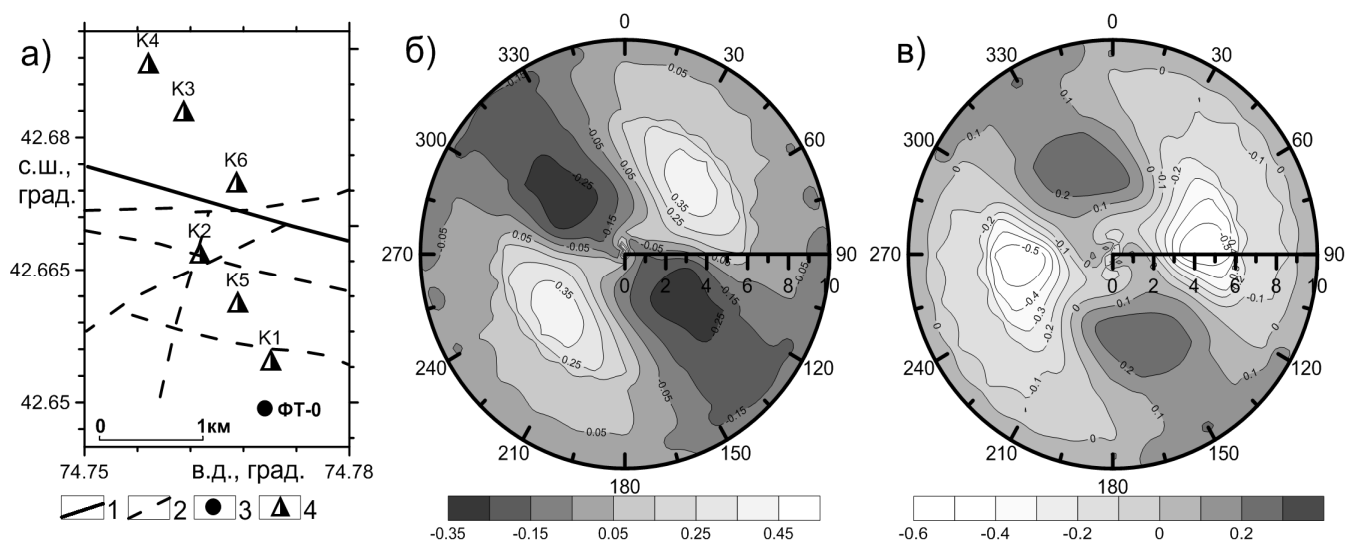


Рисунок 4.1 – Корреляционные полярные диаграммы для участка миниполигона Кентор: а) – схема расположения пунктов мониторинга и разломы: 1 – Шамсинский региональный разлом, 2 – локальные разломы, 3 – пункт МТ-мониторинга, 4 – пункты светодальномерных наблюдений. Корреляционные диаграммы для вариаций кажущегося сопротивления (dR_o) в пункте ФТ-0 и: б) – северной компонентой лунно-солнечных приливных воздействий (A_v), в) – изменений длин базовых линий между пунктами К5 и К2 по результатам светодальномерных наблюдений, описание диаграмм дано в тексте

В работах [39, 40] в качестве основной причины изменений активного электросопротивления в геологической среде, рассматривалось перераспределение флюидов в порово-трещинном пространстве горных пород в связи с деформационными процессами. Вероятно, этот механизм в формировании вариаций электросопротивления не является единственным. Попробуем рассмотреть механизм формирования вариаций активной и реактивной составляющих электросопротивления. Для этого впервые был выполнен корреляционный анализ реальных и мнимых частей компонент тензора импеданса с характеристиками деформаций дневной поверхности: лунно-солнечными приливами и изменениями длин базовых геодезических линий. Оценка вклада каждой составляющей электросопротивления (активной и реактивной) в формирование вариаций электропроводности весьма актуальна для развития методики магнитотеллурического мониторинга. При этом особое внимание должно уделяться роли и информативности дополнительных импедансов в выявлении тензочувствительных зон.

По аналогии с методом импедансной спектроскопии [41] рассмотрим реальные и мнимые компоненты импедансов, зависимость которых от емкостных и индуктивных характеристик отражают формулы (4.2) и (4.3), и сопоставление которых с временными рядами лунно-солнечных

приливов и изменениями длин базовых геодезических линий позволило оценить соотношение изменений активного и реактивного сопротивлений в наблюдаемых вариациях:

$$\operatorname{Re} Z = \frac{\frac{L}{C} R - \frac{R}{\omega C} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (4.2),$$

$$\operatorname{Im} Z = \frac{-\frac{R^2}{\omega C} - \frac{L}{C} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (4.3),$$

где Z – импеданс, R – активное сопротивление, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, $i\omega L$ – реактивное сопротивление индуктивности, $i\omega C$ – реактивная проводимость конденсатора, i – мнимая единица.

Анализ поведения дополнительных импедансов, характеризующих степень геоэлектрической неоднородности среды, результаты которого показаны на рисунке 4.2 позволил (на примере данных с мини-полигона Кентор) определить их роль для оценки тензочувствительности пунктов наблюдения. На рисунке 4.2 показано распределение значений коэффициентов корреляции временных рядов вариаций реальных и мнимых компонент основных и дополнительных импедансов с временными рядами изменений длин базовых линий и лунно-солнечных приливов для пункта наблюдения ФТ-0.

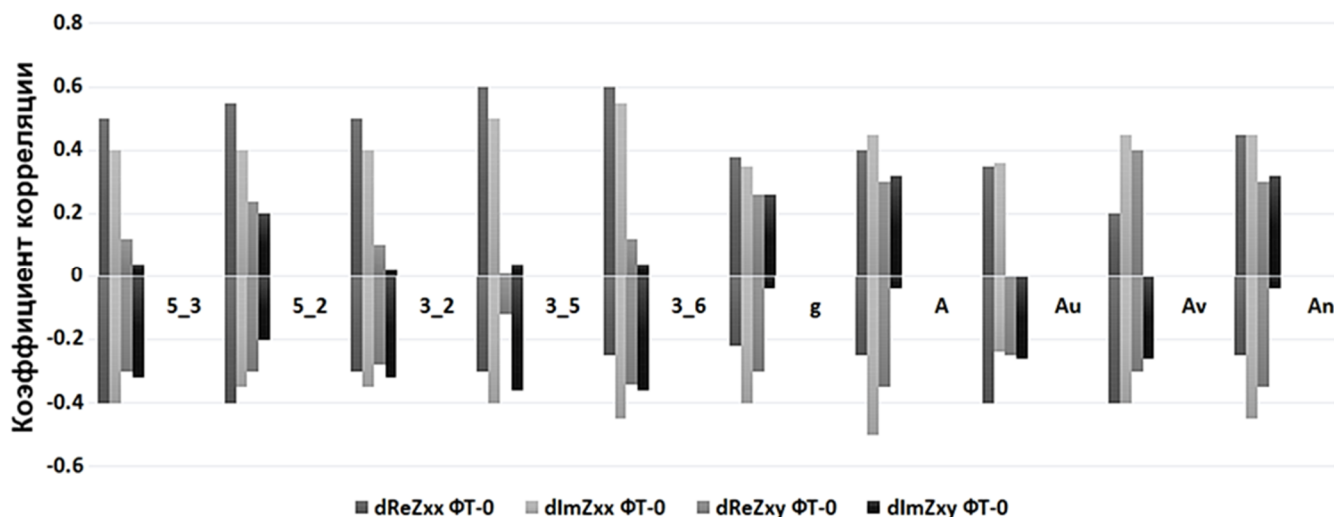


Рисунок 4.2 – Распределение значений коэффициентов корреляции между вариациями реальной $dReZ_{xx}$ и мнимой $dImZ_{xx}$ частями дополнительного импеданса, реальной $dReZ_{xy}$ и мнимой $dImZ_{xy}$ частями основного импеданса с изменениями длин базовых линий, цифрами обозначены номера пунктов (рис. 1а), между которыми измерялось расстояние и приливными воздействиями (g – горизонтальная компонента, A – полный вектор, Au –восток-запад, Av – север-юг, An – вертикальная компонента)

Очевидно, что значения коэффициентов корреляции между временными рядами мнимых частей импедансов и временными рядами приливных воздействий и деформаций, соизмеримы с таковыми для реальных частей импедансов. Этот факт свидетельствует о том, что вариации реактивной составляющей электросопротивления (рис.4.3), связанные с изменениями ёмкостных (и возможно индуктивных) характеристик массивов горных пород в естественном залегании при деформационных процессах, реагируют на приливные воздействия и деформации также, как и вариации активной составляющей электросопротивления.

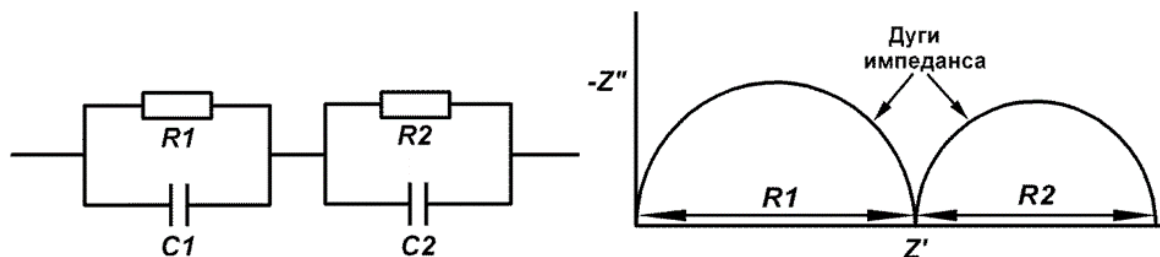


Рисунок 4.3 – Схематическое изображение R-C цепей (индуктивность массивов горных пород не рассматривается) и соответствующих им дуг импеданса для двух уровней геоэлектрических неоднородностей

Выводы

Таким образом, в результате анализа электромагнитных параметров среды на предмет выявления их взаимосвязи с лунно-солнечными приливными воздействиями и деформациями дневной поверхности, установлено, что характер этой взаимосвязи зависит от геоэлектрической структуры пункта зондирования.

Предложен новый подход к представлению результатов корреляционного анализа данных магнитотеллурического мониторинга в системе полярных координат. На корреляционных полярных диаграммах выделены области (кластеры) устойчивой корреляции, которые являются интегральной мерой взаимосвязи вариаций электромагнитных параметров с деформациями дневной поверхности.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что положение кластеров на корреляционных полярных диаграммах связано с геоэлектрической структурой пункта наблюдения и соответствует ориентации основных тектонических элементов в окрестности этого пункта.

Выполнена оценка информативности дополнительных импедансов, на основании чего сделан вывод о необходимости использования данного параметра для оценки тензочувствительности пунктов наблюдения.

Результаты анализа активной и реактивной составляющих сопротивления могут быть использованы для развития новых представлений о механизмах формирования вариаций электросопротивления геосреды.

5 Построение алгоритмического обеспечения системы распознавания образов для комплексного анализа геолого-геофизических данных

5.1 Построение алгоритмов распознавания образов для комплексного анализа геолого-геофизических данных на основе применения оптимальных согласованных фильтров

Прежде чем начать анализ результатов геофизических наблюдений, необходимо разобраться в вопросе: что мы измеряем? Этот вопрос особенно актуален при проведении геомагнитных наблюдений, когда применяется классическая разностная методика наблюдений. Ответ на этот вопрос является очень важным, особенно на этапе интерпретации наблюдаемых вариаций. Как и при любых прогностических исследованиях, ставится задача получения информации о процессах, происходящих на глубинах заложения гипоцентров сейсмических событий, а также о природе наблюдаемых вариаций геомагнитного поля.

Разностная методика применяется повсеместно и давно. Но решает ли она в полной мере поставленные задачи. На этот вопрос возможно ответить, если изначально предположить, что мы имеем дело с переменным магнитным полем источников. При этом переход к постоянному полю возможно выполнить простым предельным переходом, когда длина волны стремится к бесконечности, или то же самое, когда частота поля стремится к нулю.

Рассмотрим простой случай измерения вариаций геомагнитного поля двумя магнитовариационными станциями (рисунок 5.1), расположенными на поверхности Земли. Необходимо отметить, что эта система является симметричной относительно поверхности Земли. Поэтому достаточно рассмотреть одну полуплоскость, в данном случае верхнюю. Предположим, что источник переменного магнитного поля находится сверху.

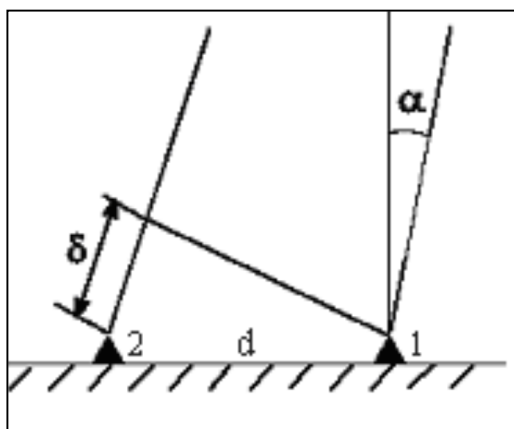


Рисунок 5.1 — Схема измерительной системы, состоящей из двух магнитовариационных станций: d – расстояние между станциями; α – угол между вертикальной плоскостью и направлением на источник переменного магнитного поля; δ – разность расстояний между источником и магнитовариационными станциями

Полный вектор геомагнитного поля на каждой станции можно представить в следующее виде:

$$\begin{cases} T1 = T_{\max} * \sin(\omega t) + T1^0 \\ T2 = T_{\max} * \sin(\omega t - \varphi) + T2^0 \end{cases} \quad (5.1)$$

где φ – сдвиг фаз зарегистрированного поля между магнитовариационными станциями 1 и 2 (сдвиг фаз определяется геометрией измерительной системы):

$$\varphi = 2 * \frac{\pi \cdot \delta}{\lambda} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \quad (5.2)$$

В (5.1) $T1^0$ и $T2^0$ представляют постоянное магнитное поле, определяемое намагниченностью пород непосредственно под соответствующими магнитовариационными станциями.

Результирующее значение при применении разностной методики определится:

$$\Delta T = T1 - T2 = T_{\max} (\sin(\omega t) - \sin(\omega t - \varphi)) + \Delta T^0 \quad (5.3)$$

Далее рассмотрим переменную часть поля. После преобразования уравнения (5.3) получим:

$$\begin{aligned} \Delta T &= -2 \cdot T_{\max} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \omega \cdot t - \varphi}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) &\rightarrow \sin\left(\frac{\pi \cdot d \cdot \sin(\alpha)}{\lambda}\right) \end{aligned} \quad (5.4)$$

Система, состоящая из двух или более приемников, приобретает новое свойство – характеристику направленности:

$$R_{\perp} = \sin\left(\frac{\pi \cdot d \cdot \sin(\alpha)}{\lambda}\right) \quad (5.5)$$

На рисунке 5.2 показаны характеристики направленности точечного приемника и разностной системы при отношении $d/\lambda=0,05$. Хорошо видна потеря чувствительности разностной системы.

При стремлении отношения d/λ к нулю характеристика направленности разностной системы вырождается в точку.

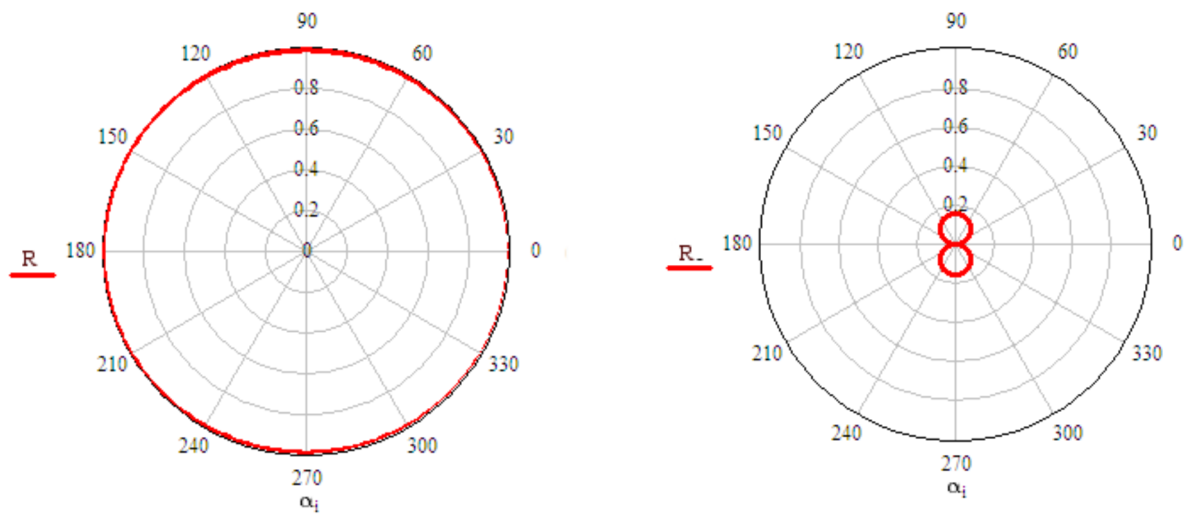


Рисунок 5.2 — Характеристики направленности точечного и разностного приемника

Как видно из уравнения (5.5), при $\lambda \rightarrow \infty$ $R \rightarrow 0$. Это означает, что все источники магнитного поля, расположенные в вертикальной плоскости (в том числе глубинные источники) полностью подавляются. Таким образом, наблюдаемые слабые вариации магнитного поля определяются только приповерхностными источниками, расположенными непосредственно под магнитовариационными станциями.

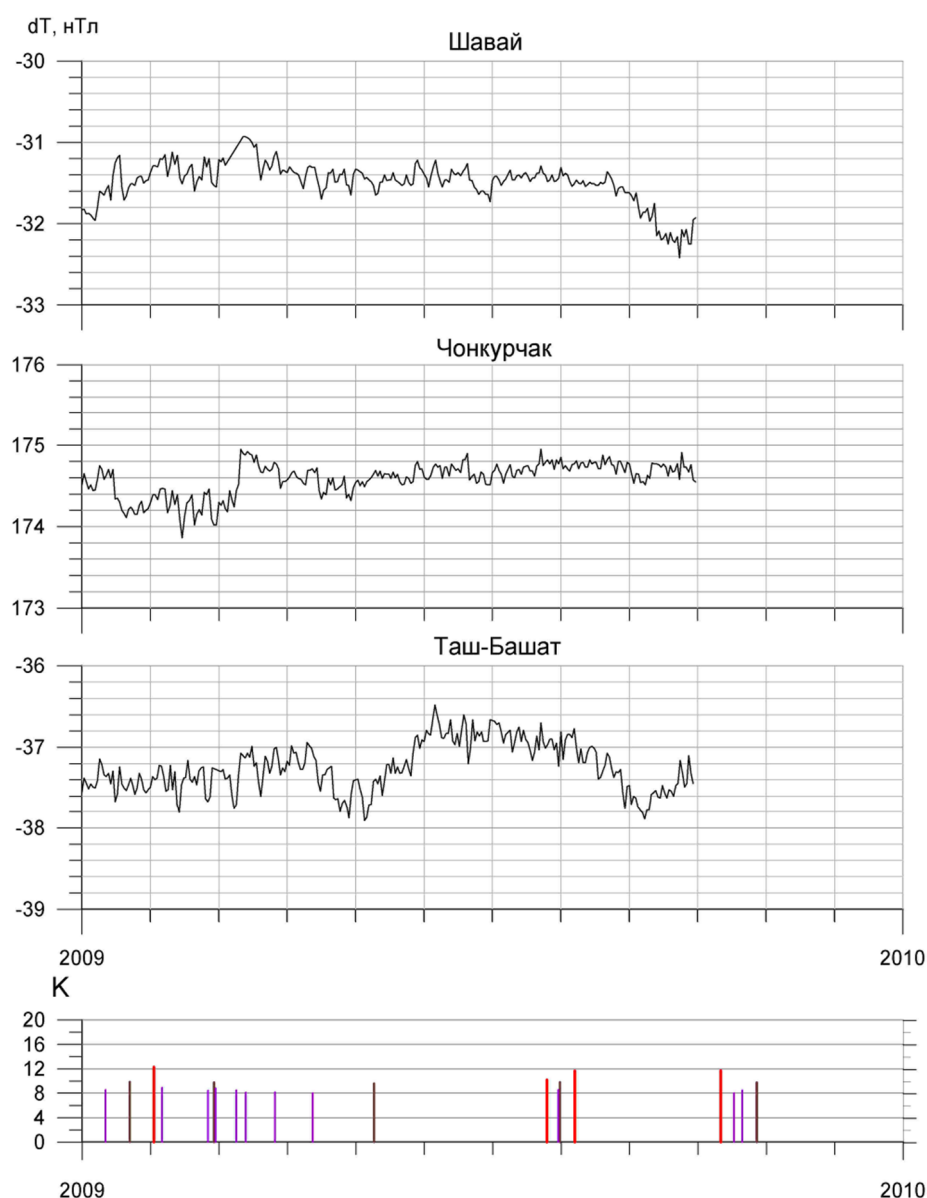


Рисунок 5.3 — Пример временных рядов вариаций разностей полного вектора магнитного поля в пунктах Шавай, Чон-Курчак, Таш-Башат. В нижней части рисунка показаны сейсмические события, произошедшие на территории Бишкекского геодинамического полигона в 2009 г.

Необходимо отметить особенность размещения пунктов геомагнитных наблюдений на территории Бишкекского прогностического полигона. Станции располагаются на дне ущелий или небольших межгорных впадин, сложенных, как правило, четвертичными отложениями. Учитывая это обстоятельство, можно предположить, что природа наблюдаемых вариаций на территории Бишкекского прогностического полигона обусловлена в первую очередь электрокинетическими процессами в приповерхностной зоне, которые зависят от множества факторов, не связанных с геодинамическим процессом.

По этой причине выделение вариаций напряженности магнитного поля, обусловленных геодинамическим процессом среди множества подобных, вызывает значительные трудности.

Однако в какой-то степени задача немного упрощается, если геомагнитные наблюдения комплексируются с другими режимными наблюдениями, в частности, с электромагнитными наблюдениями. Для примера на рисунках 5.3-5.4 показаны временные ряды вариаций разностей полного вектора на стационарных пунктах наблюдения и сейсмические события, произошедшие в этот период на полигоне. Некоторые вариации магнитного поля предшествуют сейсмическим событиям или совпадают с ними. Однако, как видно из рисунков, во временных рядах присутствует достаточное количество вариаций и большей амплитуды, которые невозможно связать с сейсмическими событиями и которые не нашли отражения в результатах электромагнитных наблюдений.

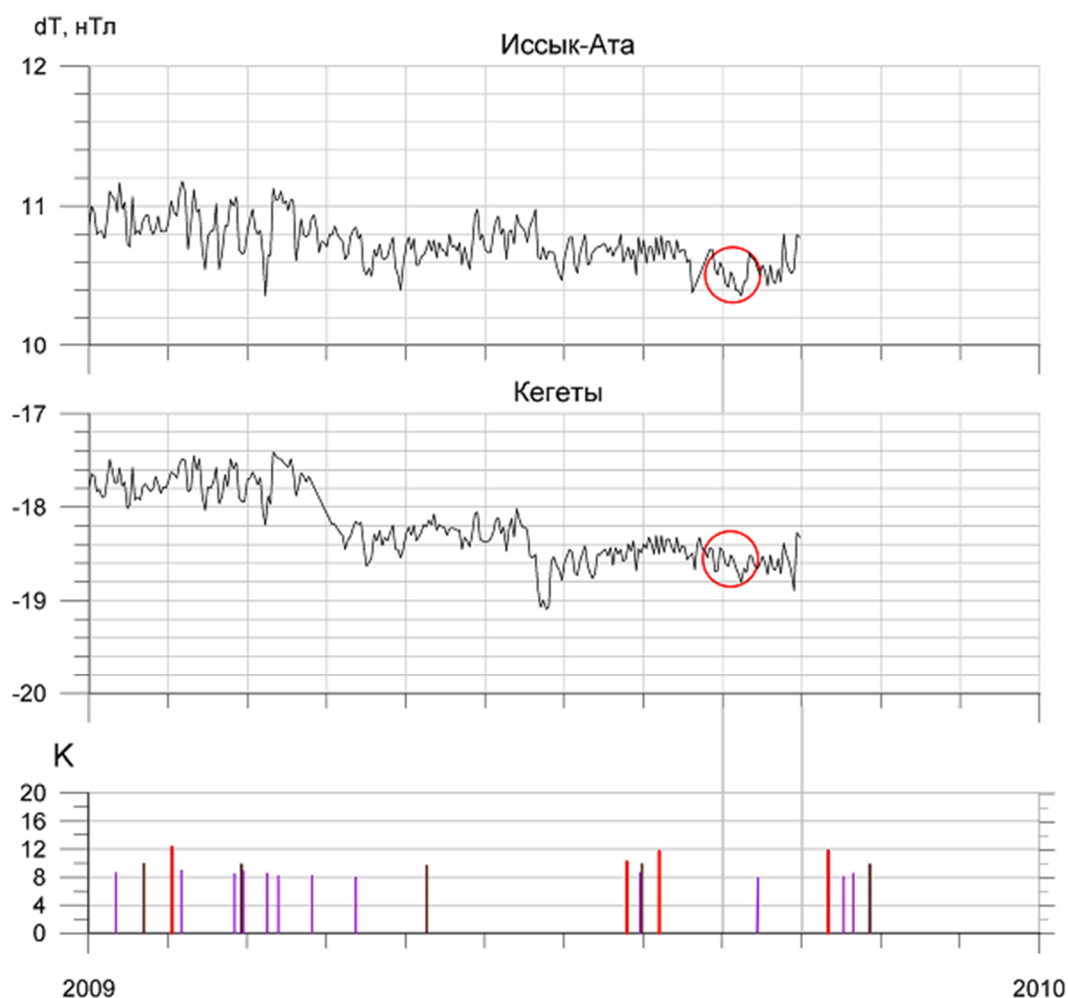


Рисунок 5.4 — Временные ряды вариаций разностей полного вектора магнитного поля в пунктах Иссык-Ата, Кегеты. В нижней части рисунка показаны сейсмические события, произошедшие на территории Бишкекского геодинамического полигона в 2009 г.

Проведенные электромагнитные исследования выявили различия в протекании напряженно-деформационных процессов в разных горизонтах земной коры. При этом на территории Бишкекского геодинимического полигона активизация приповерхностных деформационных полей, как правило, не приводит к землетрясениям. В то время как глубинные деформационные процессы реализуются землетрясениями различной силы. Учитывая этот факт, можно утверждать, что разностная методика изучения вариаций геомагнитного поля, применяемая в настоящее время, может оказаться неэффективной. Причем, как следует из приведенных выкладок, чем ближе располагаются приемные станции (магнитовариационные станции), тем меньше у них чувствительность к глубинным процессам. При увеличении расстояния между приемными станциями сказывается недокомпенсация внешнего поля.

В середине 80-х годов была сформулирована идея, основанная на спектрально-временном анализе наблюдаемых значений полного вектора геомагнитного поля. Но в те годы не могла быть реализована по причине отсутствия качественных магнитовариационных станций, обеспечивающих непрерывные ряды наблюдений с хорошей дискретностью, и производительных вычислительных машин. Появления магнитовариационных станций МВ-01, МВ-07, обладающих возможностью непрерывной регистрации магнитного поля в течение периодов, соизмеримых с сотнями суток, высокой чувствительностью и точностью, в настоящее время сняло принципиальные преграды для реализации новой методики обработки наблюдаемых геомагнитных данных.

Основная идея заключается в том, что на земную поверхность падает электромагнитная волна, порожденная в ионосфере. Вследствие индукции в земной коре порождается вторичное (аномальное) магнитное поле, которое прямым образом зависит от геоэлектрического строения земной коры под станцией. Учитывая это обстоятельство, возможно выполнить мониторинг вариаций магнитного поля в частотной области на ряде фиксированных частот.

На рисунке 5.5 показан спектр мощности полного вектора напряженности магнитного поля в пункте Аксу. При расчете спектра был взят интервал времени с 01.01.2015 г. по 11.11.2015 г.

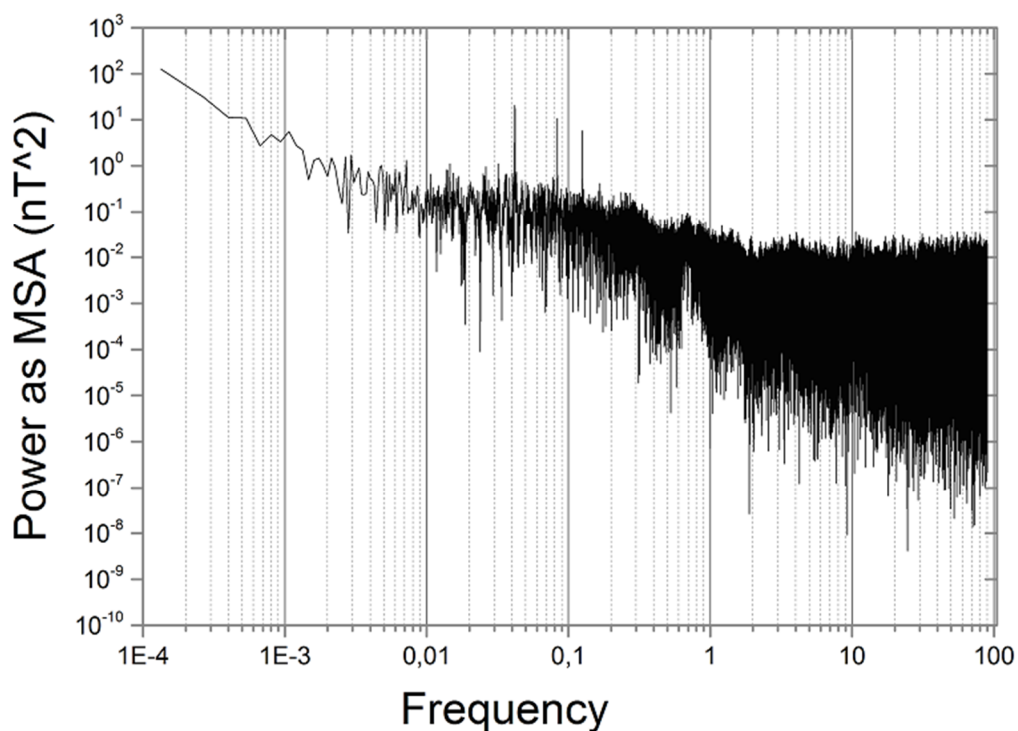


Рисунок 5.5 — Спектр мощности вариаций полного вектора напряженности магнитного поля в пункте Аксу

Следует отметить более значительную трудоемкость этой процедуры по сравнению с разностной методикой. Это сказывается на оперативности анализа наблюдаемых данных и их интерпретации.

На рисунках 5.6-5.8 представлены примеры графиков временных вариаций напряженности магнитного поля в пункте Аксу на частотах F1-F3 и графики сейсмической активности на территории Бишкекского геодинамического полигона. Следует иметь в виду, что в данном случае $F1 < F2 < F3$.

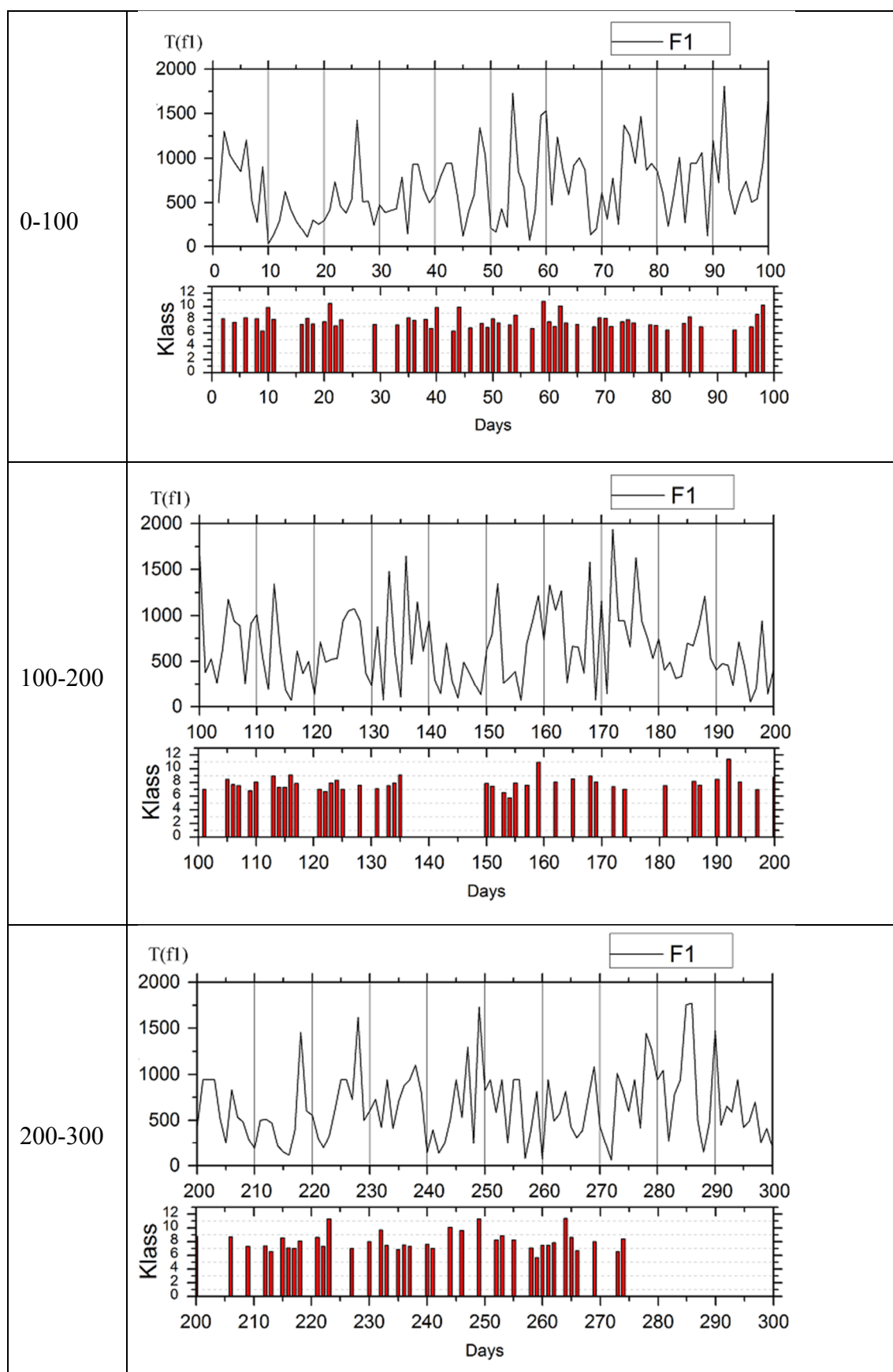


Рисунок 5.6 — Временные вариации напряженности магнитного поля в пункте Аксу на частоте F1. Колонки отмечают зарегистрированные сейсмические события

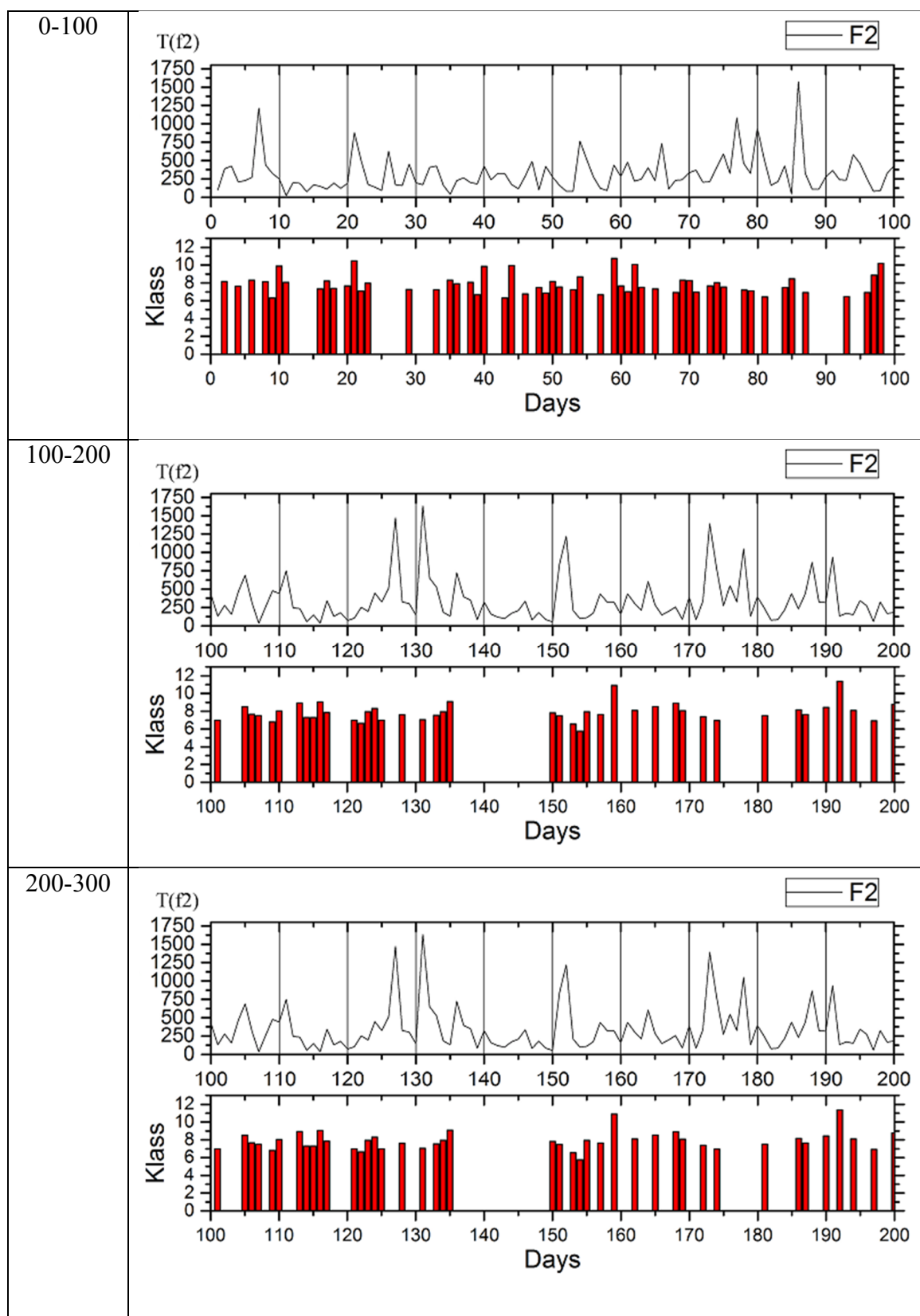


Рисунок 5.7 — Временные вариации напряженности магнитного поля в пункте Аксу на частоте F2.
Колонки отмечают зарегистрированные сейсмические события

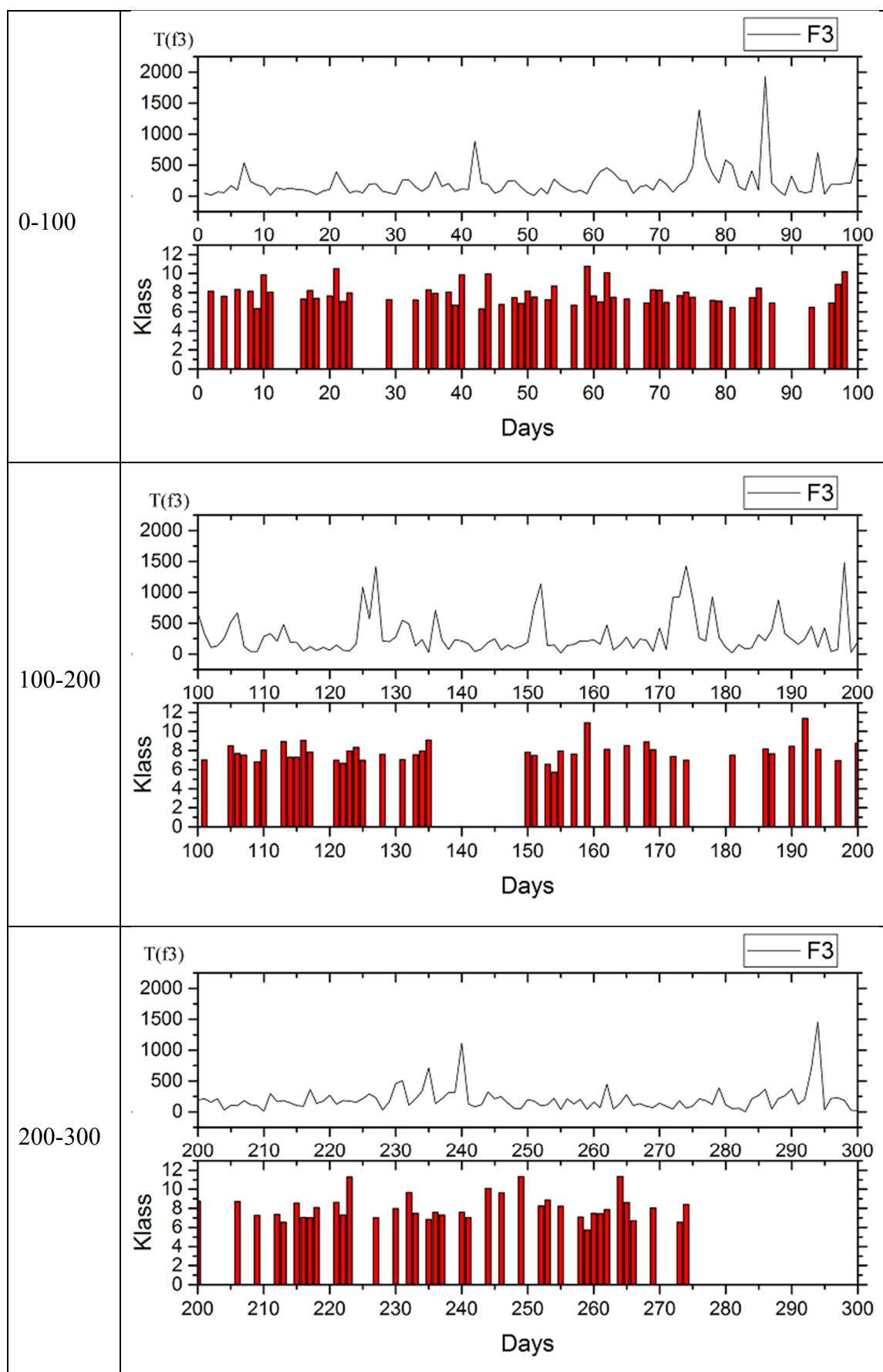


Рисунок 5.8 — Временные вариации напряженности магнитного поля в пункте Аксу на частоте $F3$. Колонки отмечают зарегистрированные сейсмические события

Учитывая это обстоятельство можно предположить, что вариационные графики отражают процессы на разных глубинах.

Данная методика анализа геомагнитных данных по своей сути похожа на магнитовариационные зондирования. Однако в данной модификации она не позволяет получать численные параметры геоэлектрического разреза. Учитывая значительную длительность рядов геомагнитных наблюдений (десятилетия), она позволяет наблюдать вариации (осуществлять мониторинг) геоэлектрического разреза на очень больших глубинах. Эффективную глубину зондирования можно приблизительно оценить через толщину скин-слоя, т. е. глубину проникновения поля, на котором амплитуда волны затухает в e раз:

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} \quad \text{или} \quad \delta = \frac{\sqrt{10\rho T}}{2\pi}, \quad (5.6)$$

где δ – толщина скин-слоя в км; ρ – среднее удельное сопротивление геоэлектрического разреза под пунктом наблюдения в Ом*м; ω – круговая частот; μ_0 – магнитная постоянная; T – период в сек. Эффективная глубина проникновения поля определяется следующим выражением:

$$z_T = \frac{\delta}{\sqrt{2}} \quad \text{или} \quad z_T = \frac{\sqrt{5\rho T}}{2\pi} \quad (5.7)$$

Эффективную глубину можно также оценить, используя априорную информацию о строении геоэлектрического разреза, полученную методами МТЗ и ГМТЗ.

В любом случае при использовании данной методики для территории Бишкекского геодинамического полигона появляется возможность мониторинга процессов, происходящих на глубинах гипоцентров землетрясений и глубже – в верхней и средней мантии. Однако техническая реализация этой задачи не проста. На первый план, как было указано выше, выступает трудоемкость вычислительного процесса при использовании стандартных программных пакетов, которая затрудняет получение оперативных данных и требует высококвалифицированного персонала. Разработка специализированного комплекса программ может устранить это неудобство.

Выводы

В любом случае, как показал наш небольшой опыт, техническая реализация сводится к решению следующих задач:

1. Преобразование первичной информации в вид, удобный для использования в расчётах.
2. Редактирование преобразованных данных. Включает в себя: устранение «ступенчатых» изменений значений магнитного поля, связанных с техногенными причинами; интерполяция или восстановление пропущенных по каким-либо причинам отдельных значений; вычисление и устранение тренда в наблюдаемом поле, связанного, как правило, с вековыми вариациями геомагнитного поля; выполнение медианной фильтрации полученного ряда с целью устранения из него ураганных выбросов, связанных с грозовой активностью в районе пункта наблюдения или какими-либо техногенными причинами.
3. Вычисление амплитудного и фазового спектров по каждому пункту геомагнитных наблюдений. Выбор характерных частот (периодов).
4. Вычисление переходных характеристик для выбранных характерных частот и построение временных рядов вариаций параметров.
5. Сравнительный анализ полученных рядов с другими геофизическими, сейсмологическими параметрами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для построения современной комплексной геолого-геофизической модели строения литосферы Тянь-Шаня на различных пространственно-масштабных уровнях Научной станцией РАН были проведены исследования и выполнена интерпретация геолого-геофизических данных в восточной части Киргизского Тянь-Шаня - Иссык-Кульской впадине. Построена двумерная геоэлектрическая модель литосферы Тянь-Шаня вдоль Барскаунского профиля (Южный борт Иссык-Кульской впадины) на основе исследований вариаций естественного электромагнитного поля Земли. Также представлена синтетическая трехмерная геоэлектрическая модель Иссык-Кульской впадины. Проанализировано влияние электропроводности водной массы озера Иссык-Куль на рассчитанные кривые кажущихся сопротивлений. В результате получена количественная оценка бокового влияния трехмерной проводящей структуры водной оболочки оз. Иссык-Куль на кривые МТЗ для пунктов наблюдений, расположенных на суше в бортовых зонах впадины. Особое внимание было уделено изучению глубинной структуры разломных зон в построенных геоэлектрических разрезах и геодинамической интерпретации профильных геоэлектрических моделей. Анализ взаимосвязи параметров геоэлектрических структур с пространственным распределением сейсмичности в зоне сочленения Иссык-Кульской впадины позволил выявить пространственную корреляцию положения гипоцентров землетрясений, произошедших на территории восточного Тянь-Шаня, с особенностями геоэлектрической структуры земной коры этого района. Было установлено, что очаги землетрясений локализуются в градиентных зонах вблизи контактов между блоками и в высокоомных объектах.

В результате анализа электромагнитных параметров среды на предмет выявления их взаимосвязи с лунно-солнечными приливными воздействиями и деформациями дневной поверхности, установлено, что характер этой взаимосвязи зависит от геоэлектрической структуры пункта зондирования. Предложен новый подход к представлению результатов корреляционного анализа данных магнитотеллурического мониторинга в системе полярных координат. На корреляционных полярных диаграммах выделены области (кластеры) устойчивой корреляции, которые являются интегральной мерой взаимосвязи вариаций электромагнитных параметров с деформациями дневной поверхности. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что положение кластеров на корреляционных полярных диаграммах связано с геоэлектрической структурой пункта наблюдения и соответствует ориентации основных тектонических элементов в окрестности этого пункта. Выполнена оценка информативности дополнительных импедансов, на основании чего сделан вывод о необходимости использования данного параметра для оценки тензочувствительности пунктов наблюдения. Результаты анализа

активной и реактивной составляющих сопротивления могут быть использованы для развития новых представлений о механизмах формирования вариаций электросопротивления геосреды.

Оценки характеристик напряженно-деформированного состояния геосреды проводились на основе анализа динамики электромагнитных параметров по данным магнитотеллурического мониторинга и режимных зондирований методом становления поля. Как показали результаты электромагнитных наблюдений в 2015 г., вариации ρ_{τ} отражают изменения напряженно-деформированного состояния геосреды не только перед значимыми сейсмическими событиями. На временных рядах ρ_{τ} наблюдаемые аномальные эффекты по своей величине были вполне соизмеримы с теми, что отмечались в период подготовки сейсмических событий более высокого класса. С целью дальнейшей разработки методического обеспечения системы обработки и анализа материалов широкодиапазонного магнитотеллурического мониторинга были выполнены опытно-методические работы на полигоне Кентор, расположенном в непосредственной близости от местоположения Научной станции РАН. Показано, что в регистрируемых временных рядах удастся выделить характерные признаки изменений напряженно-деформированного состояния среды, которые могут быть обусловлены сейсмическими событиями. Анализ временных рядов вариаций электромагнитных параметров осуществлялся в широком частотном диапазоне по результатам непрерывных магнитотеллурических наблюдений.

Дополнение базы данных временных рядов вариаций электромагнитных параметров осуществлялось как новыми результатами мониторинговых магнитотеллурических наблюдений, полученными на стационарных пунктах МТ-мониторинга Аксуу и Чон-Курчак, так и результатами повторных зондирований, выполненных в широком частотном диапазоне на полигоне Кентор на трех режимных пунктах МТ-мониторинга и 2-х сессий профильного магнитотеллурического мониторинга.

На основе применения оптимальных согласованных фильтров продолжается построение алгоритмов распознавания образов для комплексного анализа геолого-геофизических данных. Применение оптимальных согласованных фильтров позволяет выделять слабые сейсмoeлектрические и электросейсмические эффекты в земной коре при воздействии на нее сейсмических полей от землетрясений и искусственных электромагнитных полей. Проведение глубинных электромагнитных зондирований с использованием мощных источников электромагнитных полей приводит к генерации микросейсмических событий после старта сеанса электрозондирований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Трапезников, Ю.А. Магнитотеллурические зондирования в горах Киргизского Тянь-Шаня [Текст] / Ю.А. Трапезников, Е.В. Андреева, В.Ю. Баталев и др. // Физика Земли. – 1997. – № 1. – С. 3-20.
- 2 Рыбин, А.К. Глубинные электромагнитные зондирования в центральной части Киргизского Тянь-Шаня: автофер. дис. канд. физ.-мат. наук / А.К. Рыбин Москва 2001. 24 с.
- 3 Roecker, S.W. Three-Dimensional Elastic Wave Velocity Structure of the Western and Central Tien-Shan [Text] / S.W. Roecker, T.M. Sabitova, L.P. Vinnik et al. // J.Geophys.Res. – 1993. – V.98. – P.15779-15795.
- 4 Сабитова, Т.М. Сейсмотомографические исследования земной коры Тянь-Шаня [Текст] / Т.М. Сабитова, А.А. Адамова // Геология и Геофизика. – 2001. – Т.42. – № 10. – С.1543-1553.
- 5 Сабитова, Т.М. Трёхмерная скоростная модель земной коры Тянь-Шаня по данным сейсмотомографических исследований [Текст] / Т.М. Сабитова, А.А. Адамова, З.А.Меджитова, Н.Х. Багманова Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия). – Москва: Научный мир. – 2005. – С. 118-134.
- 6 Багманова, Н.Х. Волноводы в земной коре Тянь-Шаня [Текст] / Н.Х. Багманова, Е.Л. Миркин, Т.М. Сабитова (<http://www.journal.seismo.kg>) Вестник Института сейсмологии НАН КР – 2014. – № 1. – С.31-38.
- 7 Li, Z. Tomographic image of the crust and upper mantle beneath the western Tien Shan from the MANAS broadband deployment: possible evidence for lithospheric delamination [Text] / Z. Li, S. Roecker, B. Wei, H. Wang, G. Schelochkov, V. Bragin // Tectonophysics. – 2009. – 477(1-2). – P. 49–57.
- 8 Koulakov, I. High frequency P- and S- velocity anomalies in the upper mantle beneath Asia from inversion of worldwide traveltimes data [Text] / I. Koulakov // Journal of geophysical research. 2011. – Vol. 116. – B04301. – doi:10.1029/2010JB007938.
- 9 Юдахин, Ф.Н. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня / Ф.Н. Юдахин – Фрунзе: Илим – 1983. – С. 133-151.
- 10 Описание геологической карты СССР 1:200 000, лист XVIII, 1976.
- 11 Рыбин, А.К. Глубинное строение и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурических исследований / А.К. Рыбин – М.: Научный мир. 2011. – 232 с.

- 12 Сабитова, Т.М. Строение земной коры по сейсмологическим данным / Литосфера Тянь-Шаня. – М.: Наука, 1986. – 63-72 с.
- 13 Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия). – М.: Научный Мир. – 2005. – 400 с.
- 14 Fox L. Satellite-Synchronized 3-D Magnetotelluric System, U.S. Patent № 6 191 587 B1, issued February 20, 2001.
- 15 Жданов, М.С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике / М.С. Жданов – М.: Научный Мир. – 2007. – 710 с.
- 16 Goubau, W. M. MT data: removal of bias [Text] / W. M. Goubau, T.D. Gamble, J. Clarke // Geophysics – 1978. – V.43. – P.1157 – 1162.
- 17 Сафонов, А.С. Повышение точности МТ разведки / А.С. Сафонов, В. П. Бубнов // Прикладная геофизика. – 1979 – № 96 – С. 136 -142.
- 18 Jones, A.G. A comparison of techniques for magnetotelluric response function estimation [Text] / A.G. Jones, A.D. Chave, G. Egbert, D. Auld, K. Bahr // J. geophys. Res. 1989. № 94. P. 14 201 – 14 213.
- 19 Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир. – 2009. – 680 с.
- 20 Баталев, В.Ю. Интерпретация глубинных магнитотеллурических зондирований в Чуйской межгорной впадине / В.Ю. Баталев, М.Н. Бердичевский, М.Л. Голланд, Н.С. Голубцова, В.А. Кузнецов // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1989. – № 9. – С. 42-45.
- 21 Rodi, W.L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion [Text] / W.L. Rodi, R.L. Mackie // Geophysics. – 2001. – V 66. – P. 174-187.
- 22 Баталев, В.Ю. Глубинное строение и геодинамика западной части Киргизского Тянь-Шаня по данным магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований [Текст]: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук : 25.00.10 / В.Ю. Баталев – Новосибирск, 2002. – 24 с.
- 23 Баталева, Е.А. Глубинная структура крупнейших разломных зон западной части Киргизского Тянь-Шаня и современная геодинамика [Текст] : дис. ... канд. геол.-мин. наук : 25.00.10 : защищена 14.10.05 / Баталева Елена Анатольевна – Новосибирск, 2005. – 200 с.
- 24 Баталева, Е.А. Особенности глубинного строения разломной зоны Линии Николаева по данным магнитотеллурического зондирования / Е.А. Баталева, А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев, Г.Г. Щелочков, И.В. Сафронов // Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли: материалы XXXIX Тектонического совещания. Т.1. – М.: ГЕОС, 2006. - С. 43-47.

- 25 Садыбакасов И. Неотектоника центральной части Тянь-Шаня – Фрунзе: Илим – 1972. – 118 с.
- 26 Макаров, В.И. Новейшая тектоническая структура Тянь-Шаня / В.И. Макаров – М.: 1977. – 172 с.
- 27 Трофимов, А.К. Палеотектоника кайнозоя и новейшая геодинамика бассейна оз. Иссык-Куль // Тянь-Шань в эпоху новейшего горообразования. – Бишкек: Илим, 1994. С. 104 – 118.
- 28 Киссин, И.Г. Соотношение между сейсмоактивными и электропроводящими зонами в земной коре Киргизского Тянь Шаня [Текст] / И.Г. Киссин, А.И. Рузайкин // Физика Земли. – 1997. – № 1. – С. 21-29.
- 29 Брагин, В.Д. Активный электромагнитный мониторинг территории Бишкекского прогностического полигона [Текст] : дисс. ... канд. физ.-мат. наук : 25.00.10 / В.Д. Брагин. – М., 2001. – 135 с.
- 30 Зубович, А.В. Поле деформаций, глубинное строение земной коры и пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня [Текст] / А.В. Зубович, Ю.А. Трапезников, В.Д. Брагин, О.И. Мосиенко, Г.Г. Щелочков, А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 10. – С. 1634-1640.
- 31 Баталев, В.Ю. Структура и состояние вещества литосферы Центрального Тянь-Шаня (по данным глубинных магнитотеллурических зондирований) [Текст] : дис. ... докр. геол.-мин. наук : 25.00.10 : защищена 03.04.14 / Баталев Владислав Юрьевич – Новосибирск, 2014. – 282 с.
- 32 Бакиров, А.Б. Признаки современного глубинного магматизма в Тянь-Шане [Текст] / А.Б. Бакиров, О.М. Лесик, А.П. Лобанченко, Т.М.Сабитова // Геология и геофизика. – 1996. – № 12. – С. 42-53.
- 33 Неполаризующийся электрод для наземной геофизической электроразведки / Л.Н. Лосихин, Е.К. Матюков, В.А. Пазников, П.П. Петров, Г.Н. Тимонин Патент на полезную модель RU 123979 U1, опубликовано 10.01.13 г.
- 34 Баталева, Е.А. Проявление геодинамических процессов в вариациях электропроводности (по результатам магнитотеллурических исследований) / Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К. // В сб.: Современное состояние наук о Земле: материалы международной конференции, посв. Памяти В.И.Хаина. Изд-во МГУ. – 2011. – С.193-198.
- 35 Баталева Е.А. К вопросу о взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, А.К. Рыбин // Физика Земли. – 2013. – № 3. – С.105-113.

36 Баталева Е.А. Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженного состояния среды / Е.А. Баталева, А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев // Геофизические исследования. – 2014. – Т.15. – №.4. – С.53-64.

37 Рыбин А.К. Глубинные электромагнитные исследования в Тянь-Шане – достигнутые возможности и перспективы для проведения мониторинговых магнитотеллурических наблюдений / А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев, Г.Г. Щелочков, Е.А. Баталева, И.В. Сафронов // В сб.: Проблемы предотвращения последствий разрушительных землетрясений. – Алматы, Эверо. – 2003. – С.284-291.

38 Рыбин А.К. Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня / А.К. Рыбин, Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, В.Е. Матюков // Вестник КРСУ. – 2011. – Том 11, № 4. – С. 29-40.

39 Брагин В.Д., Мухамадеева В.А. Изучение вариаций анизотропии электрического сопротивления в земной коре на территории Бишкекского геодинамического полигона // В сб. Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы. Москва-Бишкек. 2009. С.74-84.

40 Bragin, V.D. Study of the Earth's Crust Deformation Distribution at the Territory of Bishkek Prognostic Proving Ground by Electromagnetic Methods [Text] / V.D. Bragin, G.G. Schelochkov, V.A. Zeigarnik // World Conference on Disaster Reduction.– Kobe, Hyogo, Japan. 18-22 January 2005. – www.unisdr.org/wcdr

41 Barsoukov, E. Impedance spectroscopy: theory, experiment and application / E. Barsoukov, J.R. Macdonald N.Y.: Willey, 2005. 595 p.